



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Student:

Ante Matić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Student:

Ante Matić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se znanjima i vještinama stečenim tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Veliku zahvalnost dugujem mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku za svu pomoć, strpljenje i savjete pružene tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem Katarini Zlopaši i kolegama Antoniju Budimu, Krešimiru Kelinu, Nikoli Kerekešu, kao i svima ostalima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Naposlijetku, posebno zahvaljujem svojoj obitelji na ukazanoj podršci i poticaju u ostvarenju svojih ciljeva.

Ante Matić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: ANTE MATIĆ

Mat. br.: 0035194329

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje trošenja spiralnih svrdla prevučenih PACVD prevlakama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing the wear of spiral drills coated with PACVD coatings**

Opis zadatka:

Primjenom postupka plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD) može se značajno povišiti otpornost na trošenje i trajnost spiralnih svrdla. U radu treba napraviti pregled dosadašnjih ispitivanja trajnosti spiralnih svrdla s i bez tvrdih prevlaka te mogućnosti povišenja otpornosti na trošenje.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti pokuse PACVD prevlačenja prevlakama TiN, TiN/TiCN i TiN/TiBN na jednakim spiralnim svrdlima od istog brzoreznog čelika. Na prevučenim svrdlima ispitati debljinu i prionjivost prevlake te predložiti i provesti pokus ispitivanja trošenja tijekom bušenja provrta u aluminijskoj ploči.

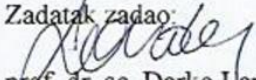
Na temelju analize rezultata ispitivanja odrediti povećanje trajnosti prevučenih svrdla i preporučiti optimalnu prevlaku.

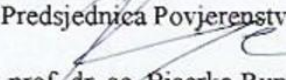
U radu navesti korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
ABSTRACT	VI
1. UVOD	1
2. BRZOREZNI ČELICI.....	2
2.1. Kemijski sastav i podjela brzoreznih čelika	2
2.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika.....	4
3. PREVLAČENJE REZNIH ALATA POSTUPKOM PACVD	7
3.1. Postupak CVD	7
3.2. Postupak PACVD	10
3.3. Svojstva PACVD prevlaka	13
4. KONSTRUKCIJA I IZRADA SPIRALNOG SVRDLA.....	17
4.1. Sile i radne površine spiralnog svrdla.....	19
4.2. Tribosustav „svrdlo-obradak“	21
5. PLAN I PROVEDBA POKUSA.....	26
5.1. Plan pokusa i toplinska obrada	26
5.2. Mjerenje početnih dimenzija svrdala.....	28
5.3. Priprema pokusa	29
5.3.1. Ulazne i izlazne veličine pokusa	29
6. REZULTATI TROŠENJA	39
7. DISKUSIJA REZULTATA	49
8. ZAKLJUČAK	51
PRILOZI.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1. Označavanje brzoreznih čelika [2]	2
Slika 2. Dijagram tipičnog postupka toplinske obrade brzoreznih čelika [3].....	5
Slika 3. Shematski prikaz postupka proizvodnje brzoreznih čelika [1].....	6
Slika 4. Faze nanošenja prevlake CVD postupkom [4]	8
Slika 5. Dijagram CVD postupka i naknadne toplinske obrade brzoreznih čelika [7].....	9
Slika 6. Shematski prikaz PACVD uređaja [12].....	12
Slika 7. Rezni alati prevučeni TiN prevlakom [13]	14
Slika 8. Svrkla prevučena TiCN prevlakom [14].....	15
Slika 9. Konstrukcija spiralnog svrdla: a) s koničnom drškom, b) s cilindričnom drškom [16]	17
Slika 10. Nazivi konstrukcijskih elemenata svrdla [16]	18
Slika 11. Odvajanje čestice i kutevi reznog alata [17].....	19
Slika 12. Komponente sila rezanja na oštrici svrdla [16]	20
Slika 13. Princip djelovanja abrazijskog trošenja [18]	21
Slika 14. Prikaz brzine trošenja slobodne plohe [16]	22
Slika 15. Prikaz trošenja dijelova svrdla [16]	22
Slika 16. Prikaz brzina posmaka i rezanja [19]	23
Slika 17. Prikaz ispitnih uzoraka skupine A	26
Slika 18. Mjerene dimenzije svrdala.....	28
Slika 19. Stupna bušilica Bosch PBD 40 [21]	30
Slika 20. Multimetar (lijevo) i pirometar (desno) [22 i 23]	31
Slika 21. Uzorak za ispitivanje debljine prevlake.....	32
Slika 22. Određivanje debljine prevlake TiN	33
Slika 23. Određivanje debljine prevlake TiCN.....	33
Slika 24. Određivanje debljine prevlake TiBN.....	34
Slika 25. Fotografiranje trošenja oštrica svrdala	35
Slika 26. Shematski prikaz plana pokusa.....	37
Slika 27. Stanje vršnih kutova nakon prvedenog pokusa	45
Slika 28. Dijagram ovisnosti vremena bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 5 mm.....	46
Slika 29. Dijagram ovisnosti vremena bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 8 mm.....	46
Slika 30. Dijagram ovisnosti temperature bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 5 mm.....	47
Slika 31. Dijagram ovisnosti temperature bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 8 mm.....	47
Slika 32. Dijagram ovisnosti snage o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 5 mm	48
Slika 33. Dijagram ovisnosti snage o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 8 mm	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri primjene brzoreznih čelika [1]	3
Tablica 2. Usporedba postupaka prevlačenja iz parne faze [9]	11
Tablica 3. Osnovna fizikalna svojstva TiN prevlake [10]	14
Tablica 4. Osnovna fizikalna svojstva TiCN prevlake [10]	15
Tablica 5. Tablica stanja svrdala prije ispitivanja	27
Tablica 6. Parametri PACVD prevlačenja	27
Tablica 7. Početne dimenzije svrdala	29
Tablica 8. Rezultati ispitivanja tvrdoće osnovnog materijala	31
Tablica 9. Početno stanje površina svrdala	36
Tablica 10. Ulazne i izlazne veličine procesa	38
Tablica 11. Stanje površina svrdala nakon izrađenih 5 provrta	40
Tablica 12. Stanje površina svrdala nakon izrađenih 10 provrta	41
Tablica 13. Završno stanje površina svrdala nakon izrađenih 15 provrta	43
Tablica 14. Kumulativne vrijednosti promjena dimenzija svrdala.....	44
Tablica 15. Srednje vrijednosti mjerenih izlaznih veličina	49

POPIS OZNAKA

<i>Oznaka</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Opis</i>
<i>E</i>	GPa	Youngov modul elastičnosti
<i>ρ</i>	g/cm ³	Gustoća
<i>ϑ</i>	°C	Temperatura
<i>λ</i>	W/(m K)	Koeficijent toplinske vodljivosti
<i>R_a</i>	μm	Površinska hrapavost
<i>α</i>	K ⁻¹	Koeficijent toplinskog istezanja
<i>F_p</i>	N	Glavna sila
<i>F_s</i>	N	Sila posmaka
<i>F_r</i>	N	Natražna sila
<i>Md</i>	N/mm	Moment bušenja svrdla
<i>S</i>	mm/okr	Brzina rezanja
<i>U</i>	V	Napon
<i>P</i>	W	Snaga
<i>T</i>	bar	Tlak
<i>t</i>	s	Vrijeme
<i>n</i>	min ⁻¹	Broj okretaja
<i>d</i>	μm	Nazivni promjer svrdla
<i>L</i>	μm	Početna duljina svrdla
<i>d</i>	μm	Promjer vrha svrdla
<i>PACVD</i>	-	Vrsta prevlake
<i>e</i>	μm	Debljina prevlake
<i>O</i>	-	Vrsta materijala obratka
<i>N</i>	-	Broj izbušenih rupa

SAŽETAK

U radu je provedeno ispitivanje otpornosti na trošenje komercijalno dobavljivih neprevučenih svrdala prevučenih PVD TiN prevlakom te dvije skupine svrdala prevučenih prevlakama PACVD. Prevlačenje PACVD provedeno je prevlakama TiN/TiCN i TiN/TiBN. Na prevučenim svrdlima provedena su ispitivanja debljina prevlake. Ispitivanje otpornosti na trošenje provedeno je bušenjem aluminijskog profila pri čemu su praćeni temperatura, snaga i vrijeme bušenja. Prevučena svrdla pokazala su značajno bolju otpornost na trošenje u odnosu na ne prevučena svrdla. najbolju otpornost na trošenje pokazala je prevlaka PVD TiN, a potom prevlaka PACVD TiN/TiBN.

Ključne riječi: brzorezni čelik, otpornost na trošenje, prevlačenje, TiN, TiN/TiCN, TiN/TiBN.

ABSTRACT

In this paper we have conducted a test of wear resistance of commercially available drill bits coated with PVD TiN coating and two groups of drill bits coated with PACVD process. PACVD coating was performed with TiN/TiCN and TiN/TiBN coatings. Coating thicknesses were determined on coated drill bits. Examination of wear resistance is carried out by drilling an aluminum profile with temperature, electricity power and drilling time followed. The coated drill bits showed significantly better wear resistance than the non-coated drill bits. The best resistance to wear was obtained with the coating PVD TiN and the second in wear resistance was PACVD TiN/TiBN coating.

Keywords: high speed steel, wear resistance, coating process, TiN, TiN/TiCN, TiN/TiBN.

1. UVOD

Uz brzi razvoj industrije javljaju se i sve veći zahtjevi za niže troškove proizvodnje, kao i zahtjevi za višu kvalitetu proizvoda. Često s kvalitetom proizvoda proporcionalno raste i vijek trajanja istog. Međutim, dok su neki tehnički materijali dosegli svoj maksimum u vidu postizanja što boljih mehaničkih svojstava, mehanička svojstva nekih alata moguće je poboljšati nanošenjem tankog, tvrdog sloja, čime se postiže viša tvrdoća površinskog sloja, a time i otpornost na trošenje i vijek trajanja samog alata, a samim prevlačenjem ne utječe se na sama svojstva osnovnog materijala.

Postupaka prevlačenja ima mnogo, no oni relevantni za ovaj rad su postupci prevlačenja iz parne faze, u prvom redu PACVD (eng. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition). Područje primjene ove tehnologije je široko, pa seže od medicine do zrakoplovne i vojne industrije.

U radu će se ispitivati otpornost na trošenje neprevučениh svrdala kao i svrdala prevučениh prevlakama TiN, TiCN i TiBN pri bušenju aluminijskog profila. Pritom će se uz konstantnu silu bušenja pratiti vrijeme, snaga i temperatura bušenja.

TEORIJSKI DIO

2. BRZOREZNI ČELICI

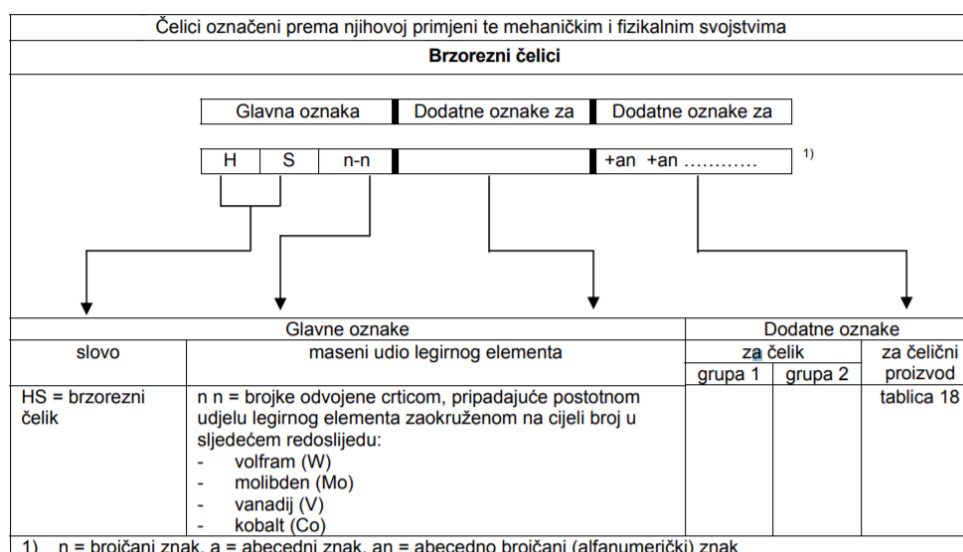
2.1. Kemijski sastav i podjela brzoreznih čelika

Brzorezni čelici, HS ili HSS (engl. High Speed Steel) su alatni čelici legirani jakim karbidotvorcima (Cr, W, V, Mo) koji s povišenim udjelom ugljika (0,7...1,3 %) stvaraju slobodne karbide postojane i pri višim temperaturama, te s Co [1]. Zbog velikih brzina rezanja, rezni alati izrađeni od HSS se zagrijevaju do približno 600 °C (a ponekad i do 1000 °C), a izloženi su i trošenju. Brzorezni čelici zbog svoje ledeburitne mikrostrukture imaju povećanu krhkost. Krhki lom karakteriziran je brzim i nekontroliranim širenjem pukotine, bez prethodne plastične deformacije [2]. Zbog svog visokog stupnja legiranosti, brzorezni čelici najskuplja su skupina alatnih čelika.

Brzorezni čelici se prema sastavu razvrstavaju u pet skupina [1]:

- Čelici s 18 %W
- Čelici s 12 %W
- Čelici s 10 %W
- W-Mo-čelici
- Mo-čelik

Označavanje brzoreznih čelika vrši se na način prikazan na slici 1.



Slika 1. Označavanje brzoreznih čelika [2]

Brzorezni čelici se, ovisno o svom sastavu, primjenjuju za razne rezne alate kao što su tokarski i blanjački noževi, igle za provlačenje, svrdla i slično. Tablica 1. prikazuje brzorezne čelike različitih sastava, kao i njihovu primjenu.

Tablica 1. Primjeri primjene brzoreznih čelika [1]

Oznaka čelika	Primjeri primjene
S-18-0-1 (0,75% C)	Zbog svoje opće neosjetljivosti pri toplinskoj obradi često se primjenjuje za: spiralna svrdla, narezna svrdla, glodala, igle za provlačenje, alate s finom oštricom, tokarske i blanjačke noževe, razvrtala.
S18-1-2-5 (0,80% C)	Tokarski i blanjački noževi za grubu obradu, alati za obradu austenitnih čelika i vatrootpornih čelika.
S18-1-2-10 (0,75% C)	Sve vrste alata za grubu obradu odvajanjem čestica, alati koje je teško intenzivno hladiti ili podmazivati, rezni alati za austenitne i vatrootporne čelike, tvrdi ili žilavi lijev, čelični lijev i neželjezne legure.
S12-1-2-5 (0,80% C)	Alat za grubu obradu, za ljevove i vatrootporne čelike.
S12-1-4 (1,25% C)	Alati za finu obradu, glodala, profilirani rezni alati, razvrtala, alati za rad na automatima, odrezni noževi.
S12-1-2 (0,95% C)	Rezni alati za obradu materijala srednje čvrstoće, tokarski noževi, glodala, profilna glodala, razvrtala, kružne i tračne pile za metal i drvo, spiralna svrdla.
S12-1-4-5 (1,35% C)	Tokarski noževi za finu obradu i za obradu na automatima, alat za narezivanje, alat za rad uz nedovoljno hlađenje.
S10-4-3-10 (1,30% C)	Tokarski noževi i glodala za fini i za grubi rad, alat za drvo, profilirani alat, alat za rad na automatima.
S6-5-2 (0,90% C)	Spiralna svrdla, glodala, razvrtala, alat za navoje, igle za provlačenje, segmenti kružnih pila, udarno opterećen alat, tračne pile za metal, kalupi za hladno oblikovanje lima, štance za toplo opsijecanje (otkovaka).
S6-5-2-5 (0,80% C)	Rezni alati za najteže uvjete grube obrade, udarno opterećeni alati, alati za obradu drva, spiralna svrdla za teški rad.
S2-9-1 (0,80% C)	Narezna i spiralna svrdla, glodala, razvrtala, igle za provlačenje (vrlo osjetljiv na toplinsku obradu).

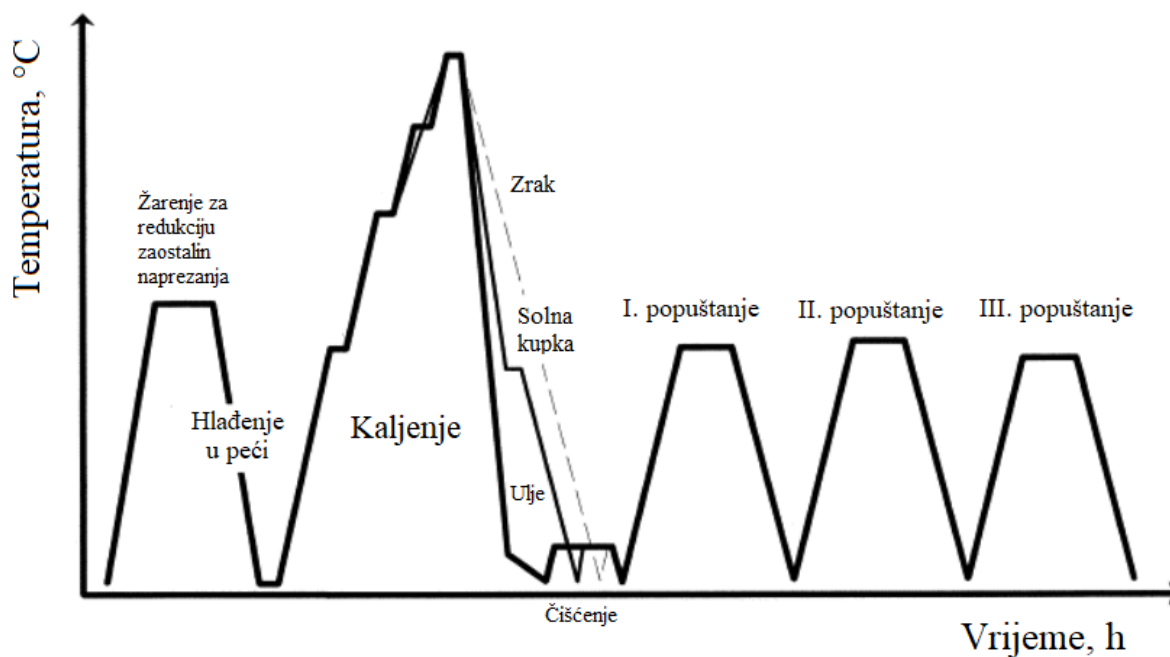
2.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika

Toplinska obrada brzoreznih čelika vrlo je važna kako bi se mikrostruktura odabranog materijala transformirala u mikrostrukturu povoljnu za eksploatacijske uvjete. Bitna svojstva za brzorezne čelike su žilavost, otpornost na trošenje i otpornost pri višim i visokim temperaturama.

„Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije vanjskog opterećenja, uglavnom udarnog, s tim da se prije loma plastično deformira [2]“. Kako bi se smanjila krhkost zbog ledeburitne mikrostrukture koja nastaje uslijed većeg udjela legirnih elemenata, mreža karbida se mora razbiti, a to se vrši plastičnom toplom preradom. Time se postiže mikrostruktura sa sitnim, ravnomjerno raspodijeljenim karbidima koja je najpogodnija za eksploataciju.

Skupina autora iz [1] navodi primjer toplinske obrade za brzorezni čelik HS18-0-1, koji je podeutektički, zbog čega mu je temperatura austenitizacije vrlo visoka (1200...1300 °C), a pritom austenit otapa dovoljno ugljika (0,5...0,6 %C) što je preduvjet za postizanje visoke tvrdoće nakon postupka kaljenja. Samom kaljenju, zbog niske toplinske vodljivosti brzoreznih čelika, prethodi trostupnjevano predgrijavanje pri 550, 850 i 1060 °C, a mikrostruktura nakon postupka je: $M + A_z + K'' + K^e$. Dakle, sastoji se od martenzita (M), zaostalog austenita (A_z) sekundarnih (K'') i eutektskih (K^e) karbida.

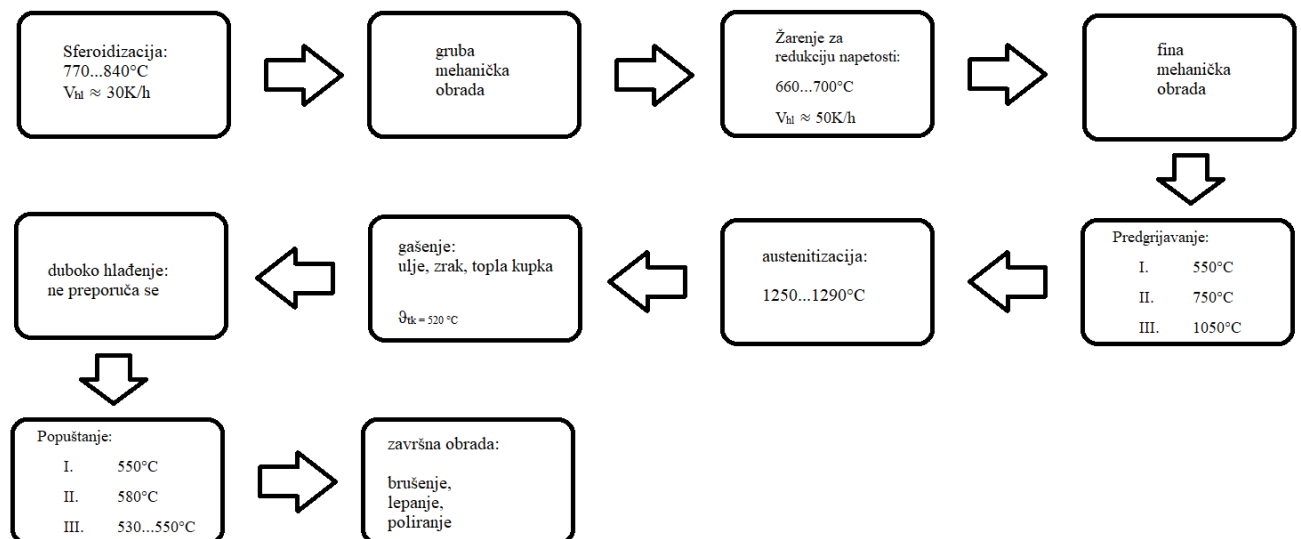
Kod brzoreznih čelika vrlo je bitna pojava sekundarnog otvrdnuća („sekundarne tvrdoće“), gdje se pri popuštanju pri oko 580 °C postiže gotovo maksimalna tvrdoća zbog transformacije zaostalog austenita u sekundarni martenzit (M'') i formacije karbida popuštanja (K_p). U praksi se provodi po dva ili tri popuštanja pri 560...600 °C u trajanju po jedan sat i time se postiže mikrostruktura: $M + M'' + K'' + K^e + K_p$. Dakle, završna mikrostruktura sastoji se od martenzita (M), sekundarnog martenzita (M'') i sekundarnih (K'') i eutektskih (K^e) karbida i karbida popuštanja (K_p). Na slici 2 prikazan je dijagram postupka toplinske obrade brzoreznih čelika.



Slika 2. Dijagram tipičnog postupka toplinske obrade brzoreznih čelika [3]

Na slici 3. prikazan je ciklus proizvodnje brzoreznih čelika. Uobičajeno se sastoji od nekoliko koraka:

- 1) Sferoidizacijsko žarenje
- 2) Gruba mehanička obrada
- 3) Žarenje za redukciju napetosti
- 4) Fina mehanička obrada
- 5) Predgrijavanje (tri predgrijavanja)
- 6) Kaljenje
- 7) Popuštanje
- 8) Završna obrada



Slika 3. Shematski prikaz postupka proizvodnje brzoreznih čelika [1]

3. PREVLAČENJE REZNIH ALATA POSTUPKOM PACVD

3.1. Postupak CVD

U moderno vrijeme, sve veći zahtjevi na alate i konstrukcijske elemente rezultirali su razvojem raznih postupaka nanošenja prevlaka kako bi se povećala otpornost i trajnost alata i konstrukcijskih elemenata. Postupci prevlačenja u parnoj fazi dijele se na [4]:

- 1) CVD (eng. Chemical Vapour Deposition) – kemijsko nanošenje iz parne faze
- 2) PVD (eng. Physical Vapour Deposition) – fizičko nanošenje iz parne faze
- 3) PACVD (eng. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) – plazmom potpomognuto kemijsko nanošenje iz parne faze

CVD predstavlja postupak kemijskog nanošenja iz parne faze, što znači da se komponente gibaju pomoću „kemijskog transporta“ [5]. Prevlaka koja se stvara ovim postupkom nastaje interakcijom između smjese plinova i zagrijanog osnovnog materijala. Ovim je postupkom moguće postići tanke prevlake mnogih metala, ali i spojeva iz skupine neoksidne keramike kao što su TiC, TiN, TiCN, oksidne keramike, primjerice Al_2O_3 , TiO_2 i sl., ali i drugih spojeva kao što je DLC (engl. Diamond-Like Carbon).

Tvrde prevlake su u industriji postale vrlo važne zato što se nanošenjem tanke prevlake na rezni dio alata može znatno produžiti vijek trajanja reznog alata povećanjem otpornosti na trošenje na osnovi abrazije i adhezije i time donijeti znatne uštede [6]. Nisu rijetki ni slučajevi produljenja životnog vijeka alata i do 5 puta. Sama prevlaka može poslužiti i kao barijera korozivnim tvarima, a koeficijent trenja je niži. Prevlake koje se najčešće koriste su na bazi titana, primjerice titan karbid (TiC) i titan nitrid (TiN).

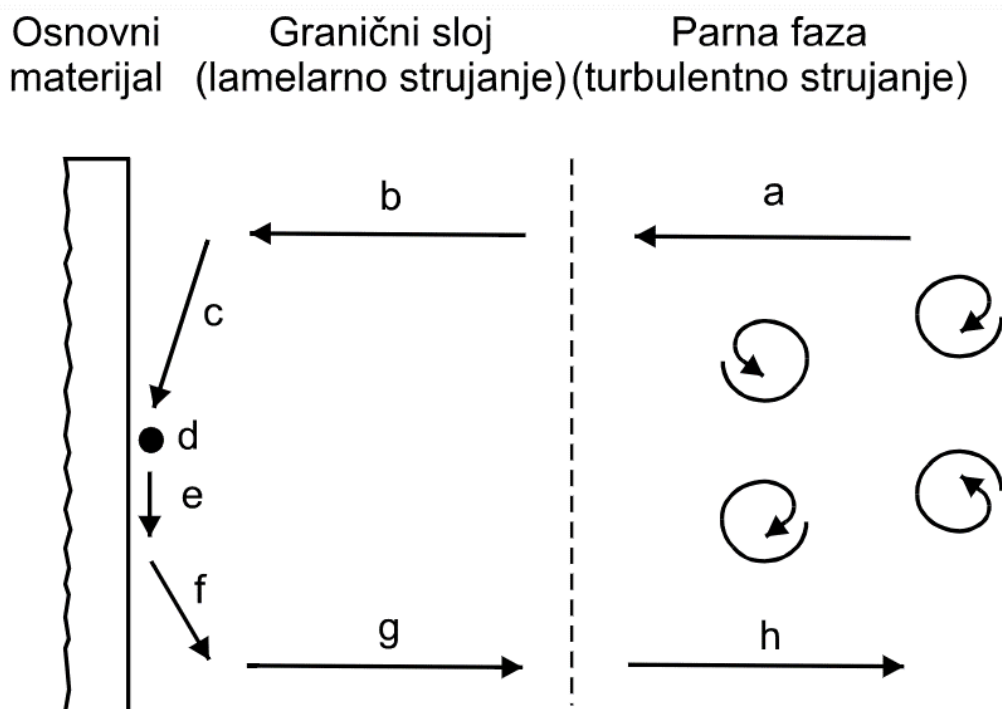
Postupak CVD svoj najveći značaj ostvaruje u područjima primjene gdje su osnovni materijali već dosegli svoja granična svojstva, primjerice kod alata za odvajanje čestica od tvrdog metala ili alata za oblikovanje od visokolegiranih alatnih čelika [5].

Osnovni parametri CVD postupka su:

- 1) Temperatura taloženje
- 2) Tlak (u području od atmosferskog tlaka do visokog vakuuma)
- 3) Koncentracija plinskih reaktanata
- 4) Ukupni protok plina

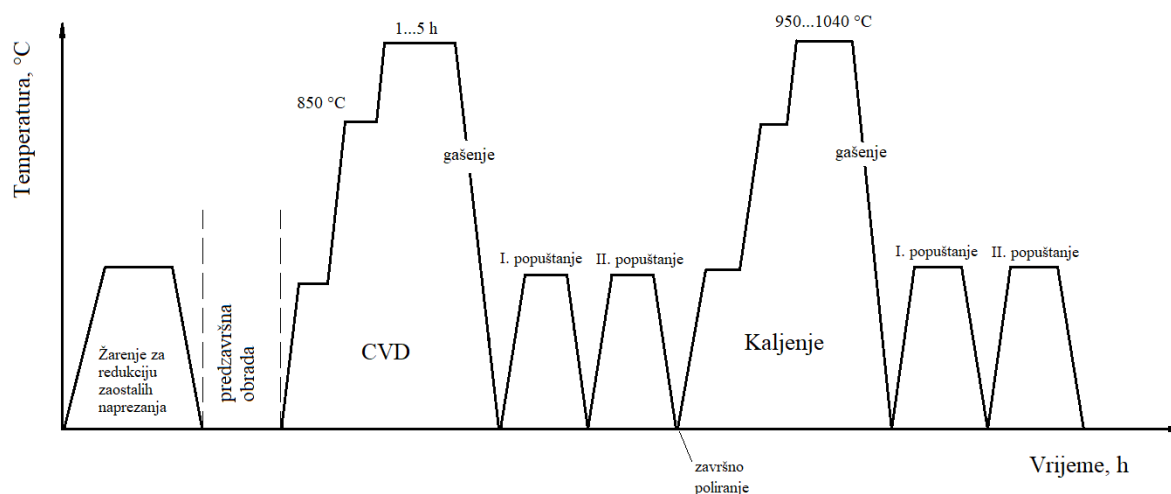
Princip taloženja CVD postupkom prikazan je na slici 3, gdje je:

- a) i h) transport plinovitih reaktanata u plinskoj fazi kroz prisilnu konvekciju;
- b) i g) transport reaktanata u laminarnom graničnom sloju zbog difuzije;
- c) adsorpcija reaktanata na zagrijanoj površini osnovnog materijala
- d) reakcija adsorbiranih reaktanata uz stvaranje tvrdog spoja
- e) površinska difuzija koji stvaraju tvrdi spoj i ugradnja u kristale rastućeg tvrdog sloja;
- f) desorpcija plinskih nusprodukata od strane površine osnovnog materijala.



Slika 4. Faze nanošenja prevlake CVD postupkom [4]

Dijagram CVD postupka prikazan je na slici 5.



Slika 5. Dijagram CVD postupka i naknadne toplinske obrade brzoreznih čelika [7]

Unatoč svojoj kompleksnosti, CVD postupak ima sljedeće prednosti [8];

- Mogućnost proizvodnje materijala visoke gustoće i čistoće,
- Dobra ponovljivost homogenih prevlaka i adhezija s visokom stopom taloženja koju je moguće podešavati,
- Primjenjivost za obratke kompleksne geometrije, što je prednost u odnosu na PVD postupak,
- Fleksibilnost u vidu korištenja niza različitih prekursora,
- Relativno niske temperature taloženja...

CVD postupak ima i određene nedostatke, uključujući [8]:

- Sigurnosni rizik od raznih toksičnih, korozivnih, zapaljivih i/ili eksplozivnih plinova prekursora CVD postupka,
- Često potrebna dvostruka toplinska obrada (zbog visoke temperature CVD obrade),
- Visoki investicijski troškovi za CVD uređaj,
- Opasnost od deformacija prevlake (kod čelika),
- Velika potrošnja energije tijekom prevlačenja.

3.2. Postupak PACVD

PACVD je plazmom potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze koje djeluje na principu nanošenja tankih slojeva nastalih kao produkt složenih kemijskih reakcija jednog ili više ioniziranih plinova s parnim ili plinovitim prekursorom (izvorom elemenata za prevlaku) na zagrijanom supstratu (podlozi) [4].

Razlika PACVD postupka u odnosu na CVD je između ostalog i radna temperatura na kojoj se vrši prevlačenje (800...1000 °C kod CVD i 470...580 °C kod PACVD postupka). Prije nastanka PACVD postupka bilo je nekoliko pokušaja izvođenja CVD postupka na nižim temperaturama. Dodavanjem energije u reaktor, prekursor se ionizira i aktivira, što omogućava nanošenje slojeva bez visokih temperatura nužnih kod CVD-a [6]. Sniženje radne temperature PACVD postupka postiže se stvaranjem tzv. tehničke plazme u komori za prevlačenje. Također, CVD je u usporedbi s PACVD inferioran u nekoliko točaka:

- a) Prekursori koji se koriste toksični su, korozivni, zapaljivi, čak i eksplozivni,
- b) Potrebna je dvostruka toplinska obrada zbog visoke temperature postupka,
- c) Investicijski troškovi u CVD uređaj su visoki,
- d) Kod čelika postoji opasnost deformacije prevlaka,
- e) Zbog visokih radnih temperatura i dvostruke toplinske obrade, velika je potrošnja energije.

PACVD predstavlja nadogradnju na CVD postupak koji zbog visokih temperatura i potrebe za dvostrukom toplinskom obradom nije prikladan za alatne čelike i PVD postupak koji nije primjenjiv na obratke složene geometrije zbog načina taloženja prevlake koje se provodi linijom vidljivosti (eng. line of sight). Međutim, unatoč tome, zadržane su mnoge prednosti CVD postupka, među ostalima [4]:

- 1) Mogućnost proizvodnje materijala visoke gustoće i čistoće (>99%),
- 2) Proizvodnja ujednačenih filmova s dobrom ponovljivošću i adhezijom uz relativno visoku brzinu taloženja,
- 3) Mogućnost jednolikog prevlačenja dijelova složene geometrije,
- 4) Upravljiva brzina taloženja,
- 5) Mogućnost stvaranja metastabilnih faza,
- 6) Dobra kontrola stehiometrije i debljine filma,

7) Jeftino predčišćenje.

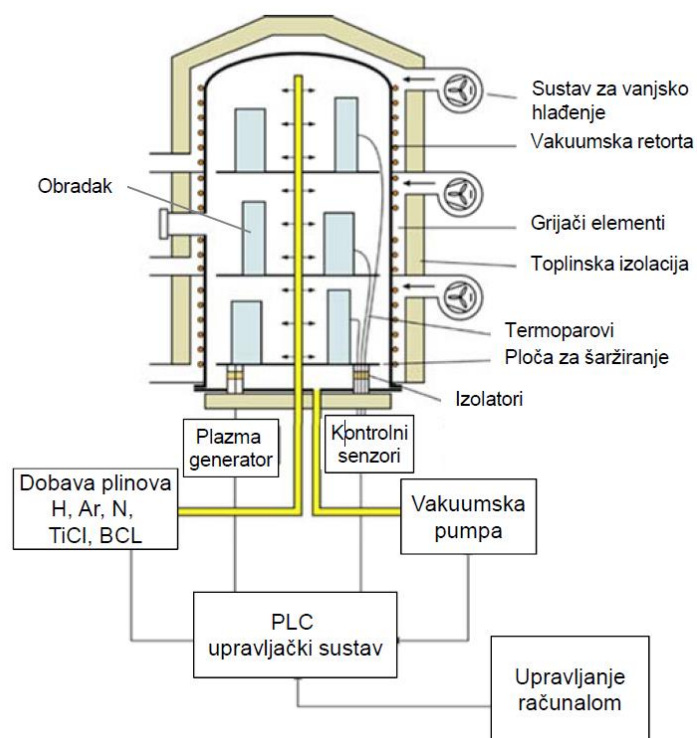
Tablica 2. prikazuje usporedbu postupaka prevlačenja iz parne faze. Vidljivo je da je PACVD zadržao većinu dobrih karakteristika postupaka PVD i CVD, uključujući i radnu temperaturu, nepotrebno je pomicanje šarže i naknadna obrada, niski troškovi održavanje i sl.

Tablica 2. Usporedba postupaka prevlačenja iz parne faze [9]

Postupak Karakteristika	PVD	CVD	PACVD
Temperatura procesa (°C)	200 - 500	800 - 1000	470 - 580
Kaljenje poslije prevlačenja	ne	potrebno	ne
Potreba za „linijom vidljivosti“	da	ne	ne
Pomicanje šarže	potrebno	ne	ne
Kvaliteta površine obratka	glatka	gruba	vrlo glatka
Poliranje poslije prevlačenja	ovisno	potrebno	ne
Dupleks proces	ne	ne	moгуće
Prionjivost na tvrde metale	vrlo dobra	vrlo dobra	prosječna
Troškovi održavanja	vrlo visoki	niski	niski
Troškovi procesa	visoki	niski	niski
Troškovi ulaganja	visoki	niski	prosječni
Primjena postupka prevlačenja	- tvrdi metali, brzorezni, niskolegirani čelici, - mali dijelovi - masovna proizvodnja - rezni alati	- dijelovi s nižim zahtjevima na postojanost mjera, - alati za duboko vučenje - tvrdi metali	- poboljšani čelik, - potrebna određena otpornost na popuštanje, - veliki alati - složene geometrije

Uređaj za prevlačenje PACVD postupkom sastoji se od vakuumske retorte (komore) s grijačima, na koju je spojen sustav za dovođenje smjese plinova (Ar, H₂, CH₄, N₂) i prekursora (TiCl₄), čiji je protok moguće regulirati, generatora plazme, sustava za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja i PLC regulacijskog sustava (eng. Programmable Logic Controller - programabilni logički kontroler). Plinu koji okružuje obradak dovodi se energija, zatim se inertni i aktivni plinovi ioniziraju i aktiviraju, čime se stvara kemijski aktivirana plazma koja omogućuje prevlačenja uz niže temperature nego kod klasičnog CVD

postupka. Parametri se reguliraju PLC-om [10]. Shematski prikaz PACVD uređaja nalazi se na slici 5.



Slika 6. Shematski prikaz PACVD uređaja [12]

3.3. Svojstva PACVD prevlaka

Najčešća primjena tvrdih prevlaka je u svrhu tribološke zaštite reznih alata te su uobičajeno sastavljene od nitrida, borida i karbida prijelaznih metala (TiN, CrN, TiAlN, TiBN, TiCN i sl.). Vrsta prevlake bira se ovisno o primjeni i materijalu alata i tribološkom sustavu. Prevlake se koriste za zaštitu površine alata od trošenja, kemijsku i korozivnu postojanost i sl. [12].

Za postizanje određene vrste prevlake (TiN, TiC, TiCN, DLC i drugi) i svojstva prevlake, potrebno je odrediti sljedeće parametre [11]:

- temperatura
- vrijeme
- tlak (podtlak)
- vrsta napajanja generatora plazme: izmjenična (AC) ili istosmjerna (DC) struja
- snaga plazme
- vrste i protoci reakcijskih plinova (N₂, H₂, Ar, TiCl₄ i drugi)

Promjenom parametara poput tlaka i temperature, moguće je utjecati na svojstva kao što su debljina prevlake i prionjivost, dok vrsta i koncentracija plina u smjesi utječe na vrstu prevlake i mehanička i adhezijska svojstva iste. Značajne promjene u odnosu na CVD postupak su prethodno spomenuta niža temperatura prevlačenja i tlak koji je kod CVD postupka varira između atmosferskog do ultravisokog vakuuma, dok se kod PACVD postupka koristi grubi do srednji vakuum (0,01...0,013 Pa).

Svojstva prevlaka TiN i TiCN

Titan nitrid (TiN) je izuzetno tvrd (9...9,5 prema Mohsovoj ljestvici) keramički materijal koji se koristi na aluminijevim legurama, čeliku kao površinska zaštita alata ili konstrukcijskih dijelova. U većini primjena debljina tankog sloja titan nitrida je manja od 5 µm. TiN spada u skupinu neoksidnih keramičkih prevlaka koje karakterizira vrlo visoka tvrdoća, visoko talište i kemijska otpornost i mali koeficijent trenja. TiN poboljšava otpornost na adheziju i abraziju.

Površina prevučena TiN prevlakom primjenjiva je do temperature od 500°C jer iznad te temperature dolazi do oksidacije sloja, što znači da pri zavarivanju može doći do oštećenja sloja [5]. U tablici 3. navedena su svojstva TiN prevlake.

Tablica 3. Osnovna fizikalna svojstva TiN prevlake [10]

Osnovna fizikalna svojstva	
Youngov modul elastičnosti, E	251 GPa
Gustoća	5,40 g/cm ³
Najviša radna temperatura	500 °C
Tvrdoća (Vickers)	2300 ± 300 HV0,05
Faktor trenja u triboparu s čelikom 100Cr6	0,60 -0,65
Koeficijent toplinskog istezanja, α	$9,35 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Koeficijent toplinske vodljivosti, λ	19,2 W/(m K)
Površinska hrapavost, R _a	0,2 μm

Na slici 6. prikazani su rezni alati prevučeni TiN prevlakom uključujući svrdla, noževe za glodalicu i tokarske noževe, rezne alate za izradu navoja, alate za obradu provrta i sl.



Slika 7. Rezni alati prevučeni TiN prevlakom [13]

Titan karbonitrid (TiCN) predstavlja još jedan spoj iz skupine neoksidne keramike koji se koristi u sličnim uvjetima kao i TiN, pa ima i slična svojstva kao što su visoko talište, visoka tvrdoća, a time i otpornost na abrazijsko trošenje, niski faktor trenja, dobra adhezivna svojstva i sl.

Za razliku od TiN, tvrdoća TiCN je nešto viša, ali je oksidacijska otpornost samo do 350 °C, dok je kod TiN 500 °C. Specifičnost ovog sloja je u dodavanju dvaju reaktivnih plinova (dušik i neki od ugljikovodika – metan, etan ili eten). U dodiru s čelicima, faktor trenja je mnogo niži nego kod TiN, stoga, kod TiCN prevlaka prevladava adhezijsko trošenje, dok je kod TiN dominantno svojstvo otpornost na abrazijsko trošenje [5]. U tablici 4. navedena su osnovna fizikalna svojstva TiCN prevlake.

Tablica 4. Osnovna fizikalna svojstva TiCN prevlake [10]

Osnovna fizikalna svojstva	
Youngov modul elastičnosti, E	450 – 1900 GPa
Gustoća	7,00 g/cm ³
Najviša radna temperatura	450 °C
Tvrdoća (Vickers)	3500 ± 500 HV0,05
Faktor trenja u triboparu s čelikom 100Cr6	0,2
Površinska hrapavost, R_a	0,17 μm

Na slici 7. prikazana su svrdla prevučena TiCN prevlakom.



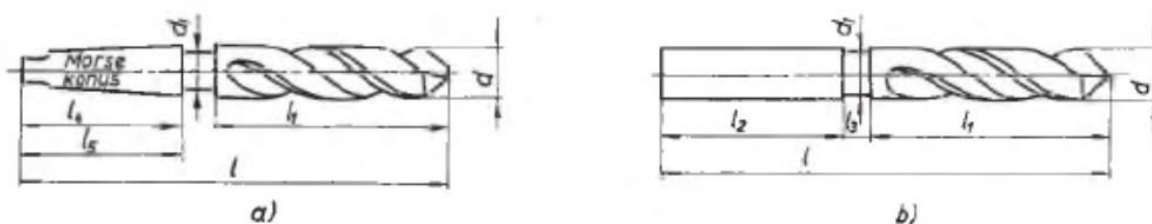
Slika 8. Svrdla prevučena TiCN prevlakom [14]

Titan bor nitrid (TiBN) je vrsta prevlake koja predstavlja veliku vrijednost za industriju svojim mehaničkim i tribološkim svojstvima. Visoke je otpornosti na trošenje i oksidaciju do 400 °C, što ga smješta između titan karbonitrida (350 °C) i titan nitrda (500 °C). Produljuje vijek trajanja i produktivnost alata na koje se nanosi. Uglavnom se koristi za prevlačenje kalupa i reznih alata.

4. KONSTRUKCIJA I IZRADA SPIRALNOG SVRDLA

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica kojim se izrađuju provrti i rupe manjih promjera ili se proširuju provrti većih promjera [15]. Postupak bušenja vrši se pomoću alatnih strojeva, bušilica, a moguće je bušiti i ručnim bušilicama.

Alat koji se koristi kod postupka bušenja zove se svrdlo. Svrkla su izrađena od cilindričnog čelika definirane geometrije reznog dijela s dvije glavne rezne oštrice i utorima sa stalnim usponom urezanim po obodu cilindra, taj uspon naziva se kut zavojnice i označava se s ω . Također, uz glavne oštrice, na samom vrhu svrdla nalazi se i poprečna oštrica koja s glavnim oštricama zatvara kut između 45 i 55°. Spiralna svrdla se prema geometriji mogu podijeliti na spiralna svrdla s koničnom i cilindričnom drškom. Slika 9 prikazuje konstrukciju spiralnog svrdla s koničnom i cilindričnom drškom. Spiralna svrdla najčešće su korišteni alati za obradu provrta.

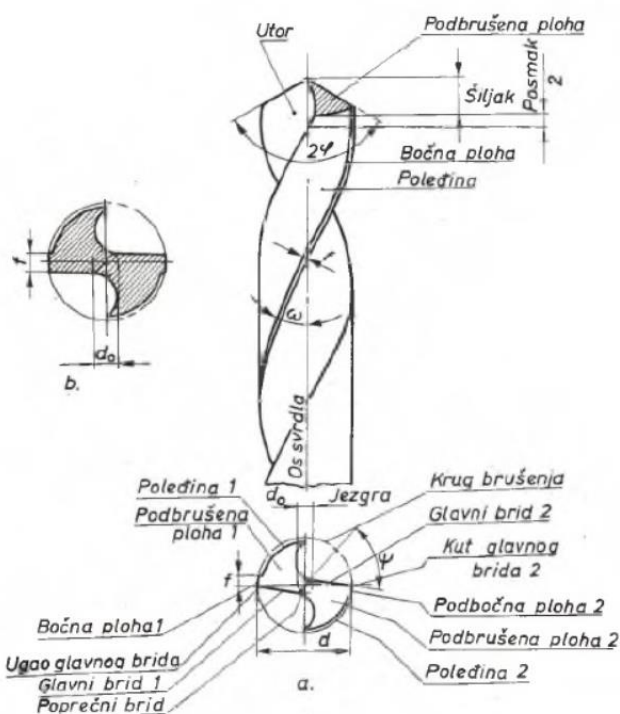


Slika 9. Konstrukcija spiralnog svrdla: a) s koničnom drškom, b) s cilindričnom drškom [16]

Utori svrdla služe za odvođenje odvojenih čestica i za dovođenje rashladnog medija. Rezni dio svrdla izrađuje se od materijala znatno veće tvrdoće od materijala koji se obrađuje, najčešće su to brzorezni čelici i tvrdi metali. Geometrija reznog dijela svrdla vrlo je bitna, kao i njegove radne plohe. Slika 10 prikazuje konstrukcijske elemente spiralnog svrdla. Kut 2ϕ predstavlja kut vrha svrdla koji čine dvije glavne oštrice, a povećanjem tog kuta, postiže se veća otpornost svrdla, a za tvrde materijale uvijek se koristi veći kut. Međutim, uz povećanje kuta i otpora rezanja, svrdlo se više opterećuje na uvijanje i izvijanje.

Kod obrađivanja rupa većih promjera, potrebno je odraditi i predbušenje u cilju smanjenja aksijalnih sila. U pravilu, za predbušenje se koristi svrdlo 50% nazivnog promjera, pa se tek onda koristi svrdlo nazivnog promjera [16].

Postoji još jedan problem koji se javlja pri bušenju, a to je prekomjerno zagrijavanje i škripanje uslijed trenja bočnih ploha pri radu. Konstrukcijski se iz tog razloga svrdla izrađuju tako da se promjer od vrha svrdla prema dršci smanjuje za 0,03...0,05 mm na svakih 100 mm. Time se izbjegava zagrijavanje i omogućava se koničnost svrdla [16].



Slika 10. Nazivi konstrukcijskih elemenata svrdla [16]

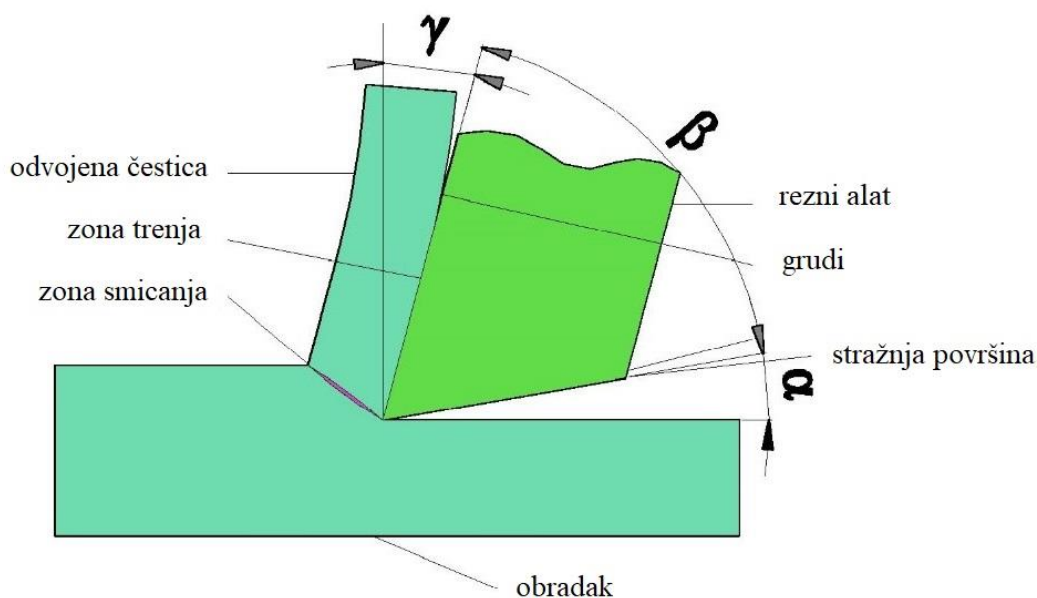
Proizvodni postupak svrdla započinje od poluproizvoda (šipke) koja je u većini slučajeva jednakog promjera kao i završni proizvod. Prvi korak je oblikovanje jednog od dva kraja šipke u stožac što se vrši na tokarilici. Pritom je svrdlo pričvršćeno u steznoj glavi tokarilice („amerikaner“) i rotira velikom brzinom, dok se tokarskim nožem odvajaju čestice šipke.

Sljedeći je korak urezivanje spiralnih utora svrdla koji se urezuju pomoću brusilice koja se postavlja pod određenim kutem u odnosu na os rotacije svrdla. Svrdlo zatim koristi translacijsko i rotacijsko gibanje u kontaktu s brusilicom kako bi se utor izradio, a postupak se zatim ponavlja na drugoj strani svrdla.

Nakon postizanja završnog oblika svrdla, slijedi toplinska obrada po parametrima propisanim određenom brzoreznom čeliku.

4.1. Sile i radne površine spiralnog svrdla

Sam proces odvajanja čestica prikazan je na slici 11. Vidljivo je da je kut α kut koji stražnja površina svrdla zatvara s površinom okomitom na os svrdla, dok kut γ prednja površina zatvara s pravcem osi svrdla. Dakle, kut β je kut između prednje i stražnje plohe reznog dijela svrdla te se, kao i kod tokarskog noža naziva kut klina, odnosno, kut oštrenja.



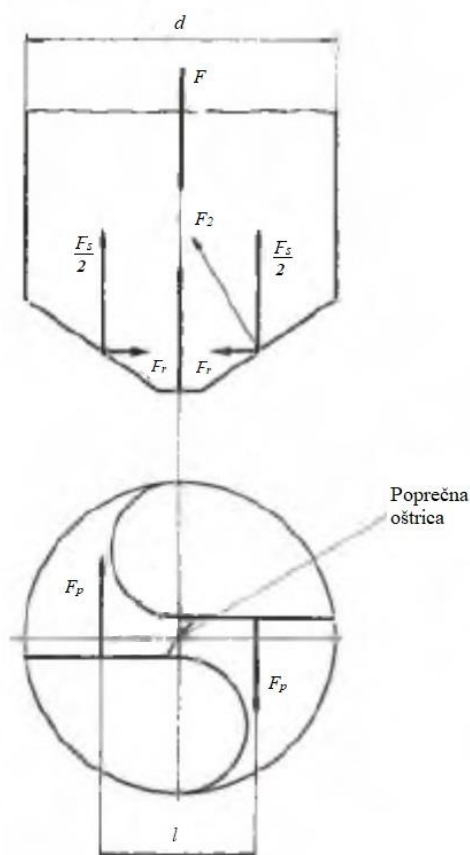
Slika 11. Odvajanje čestice i kutevi reznog alata [17]

Pri rezanju, u svakom reznom alatu u dodiru s obratkom pojavljuju se sile rezanja. Spiralno svrdlo se u većini slučajeva sastoji od dvije rezne i jedne poprečne oštrice. Pritom se sve sile rezanja mogu podijeliti u tri skupine [16]:

1. Glavna sila (F_p)
2. Sila posmaka (F_s)
3. Natražna sila (F_r)

Glavna sila, F_p , djeluje pod pravim kutom na reznú oštricu, odnosno na obje oštrice. Iz tog razloga se one poništavaju, ali njihovo djelovanje uzrokuje naprezanje materijala u obliku torzije. Sila posmaka, F_s , djeluje u smjeru osi svrdla, odnosno dvije sile $F_s/2$ djeluju na oštrice svrdla u smjeru osi, dok natražna sila, F_r , djeluje na oštricu svrdla u smjeru okomitom na os svrdla. Sile posmaka i natražna sila komponente su rezultatne sile F_2 , koja je usmjerena

okomito na oštricu. Sila koja se javlja na poprečnoj oštrici je zanemarivo mala. Sile rezanja koje djeluju na svrdlo u radu, kao i njihove komponente, prikazane su na slici 12.



Slika 12. Komponente sila rezanja na oštrici svrdla [16]

Glave sile na oštricama svrdla djeluju na udaljenosti l . Ta udaljenost nije, kao prema mnogim pretpostavkama vrijednosti $d/2$, gdje je d promjer svrdla, već je na udaljenosti (1.1)

$$l = \frac{d}{1,375} \text{ (mm)}. \quad (1.1)$$

Takav par, ili spreg, sila u svrdlu stvara zakretni moment (1.2)

$$M_d = F_p * l \left(\frac{N}{mm} \right). \quad (1.2)$$

Po uvrštavanju izraza l , dobivamo (1.3):

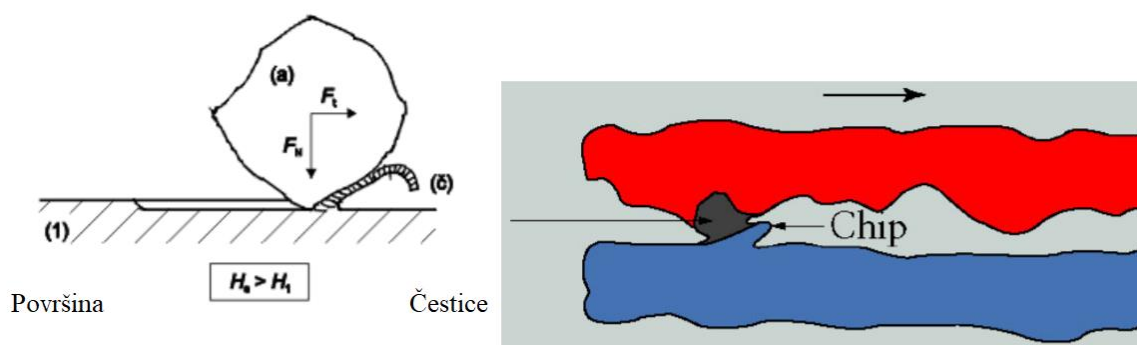
$$M_d = F_p * \frac{d}{1,375} * 9,81 \left(\frac{N}{mm} \right). \quad (1.3)$$

4.2. Tribosustav „svrdlo-obradak“

Trošenje je pojam koji opisuje gubitak materijala jednog ili oba triboelementa u dodiru, ako između njih postoji relativno gibanje [18]. Mogući mehanizmi trošenja u triboparu su:

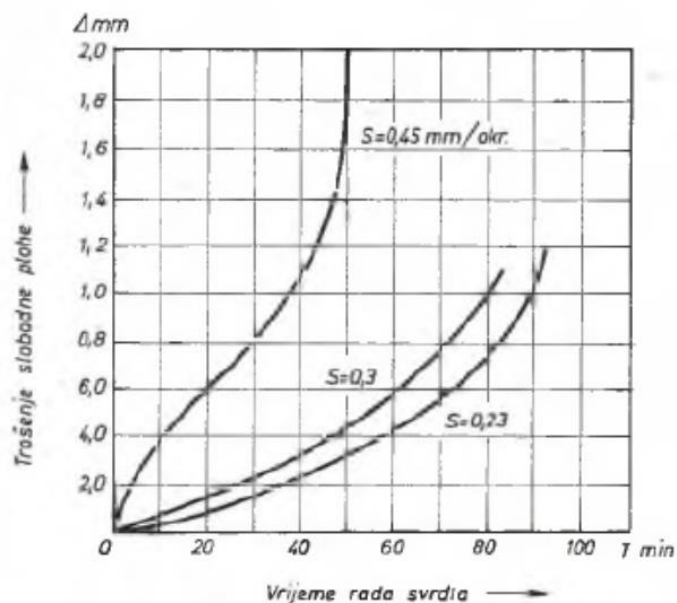
- Abrazijsko trošenje
- Adhezijsko trošenje
- Umor površine
- Tribokorozija
- Kombinacije

Na svrdlu se, kao i na svim reznim alatima u radu, javlja trošenje. To je, u prvom redu, abrazijsko trošenje. Abrazijsko trošenje definira se kao istiskivanje materijala obratka tvrdim česticama ili izbočinama, odnosno mikrorezanje materijala. Princip djelovanja prikazan je na slici 13.



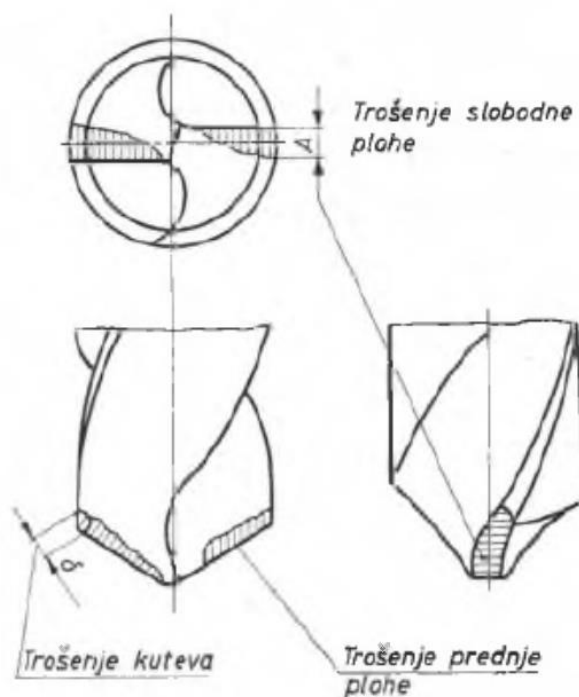
Slika 13. Princip djelovanja abrazijskog trošenja [18]

Sama brzina trošenja reznog alata ovisi o nekoliko faktora kao što su, materijal alata i obratka, brzina rezanja, posmak i sl. Brzina rezanja i brzina trošenja obrnuto su proporcionalne, dakle, što je brzina rezanja veća, to je trošenje svrdla manje. Isto vrijedi i da posmak. Slika 14 prikazuje dijagram ovisnosti trošenja slobodne plohe svrdla o vremenu rada svrdla. U dijagramu su ucrtane tri krivulje od kojih svaka predstavlja rad pri određenoj brzini rezanja u milimetrima po okretaju (mm/okr). Iz dijagrama je već po nagibu krivulje lako zaključiti kako je u slučaju rezanja pri brzini rezanja $S=0,45$ trošenje znatno brže od trošenja u slučaju $S=0,3$ ili $S=0,23$.



Slika 14. Prikaz brzine trošenja slobodne plohe [16]

Kod svrdla se pri bušenju troše rezni bridovi, a rezultat istog je zatupljenje oštice. Dio koji se najviše troši na svrdlu ovisi o materijalu koji se obrađuje, ako se obrađuje čelik, površina koja se najviše troši bit će *slobodna ploha*, dok se pri obradi lijevanog željeza i bronce najviše troše *kutovi svrdla*. Trošenje slobodne plohe najveće je na obodu, a smanjuje se prema centru [16]. Navedene plohe i dijelovi prikazani su na slici 15.

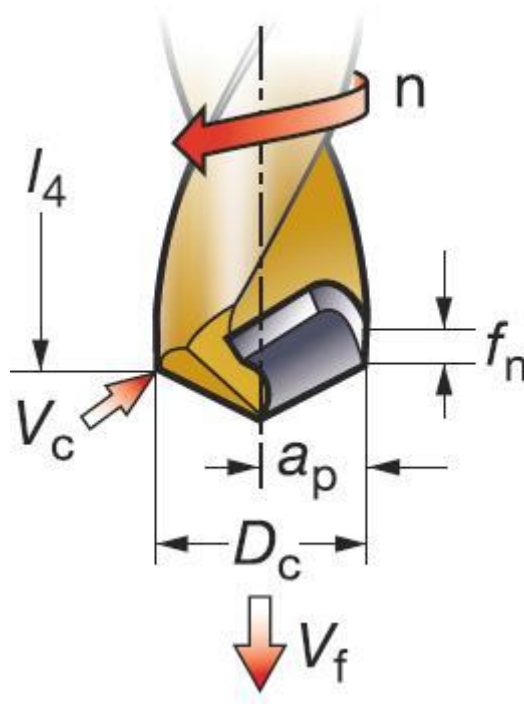


Slika 15. Prikaz trošenja dijelova svrdla [16]

Pri konstrukciji svrdla bitno je obratiti pozornost na nekoliko stavki kao što su:

- Geometrija svrdla
- Izbor materijala svrdla
- Toplinska obrada

Posmak predstavlja relativno gibanje reznog alata u smjeru obratka. Takvo gibanje je u primjeru svrdla pravocrtno u smjeru osi rotacije. Slika 16 prikazuje brzine svrdla. Brzina v_f označava posmak, a brzina rezanja definira se kao brzina na obodu svrdla. To je brzina kojom se čestica reznim alatom odvaja od obratka i označava se s v_c .



Slika 16. Prikaz brzina posmaka i rezanja [19]

Izbor brzine rezanja ovisi o nekoliko faktora, a to su:

- Vrste materijala (obratka i alata)
- Kvaliteta obrade (tolerancije, hrapavost)
- Hlađenje i podmazivanje
- Snaga stroja

Za određivanje parametara postoji nekoliko načina od kojih svaki ima prednosti i mane [20]:

- 1) Određivanje po iskustvu tehnologa – najbrži način određivanja parametara rezanja, ali postoji i rizik od pogrešaka
- 2) Određivanje po priručnicima i katalozima proizvođača alata – način određivanja pri kojemu je potrebno prepoznati specifičnosti obrade i po tome prilagođavati parametre
- 3) Određivanje programima za određivanje parametara obrade – način pri kojemu je moguće koristiti baze podataka i matematičke modele sustava obrade. Ovo je pouzdanija metoda, ali i zahtjevnija jer podrazumijeva posjedovanje odgovarajućeg računalnog sustava

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PLAN I PROVEDBA POKUSA

Eksperimentalni dio ovog rada proveden je na četiri seta komercijalno dobavljivih svrdala. Prva skupina uzoraka ostavljena je nemodificirana i dodijeljen joj je naziv „A“, dok su na ostale tri skupine nanesene različite prevlake. Osnovni materijal svih svrdala je brzorezni čelik. Set svrdala skupine A prikazan je na slici 17.



Slika 17. Prikaz ispitnih uzoraka skupine A

5.1. Plan pokusa i toplinska obrada

Tri su različite vrste prevlake: svrdla s PVD TiN prevlakom su nabavljena na tržištu (Craftomat Titanium), nazvana skupina uzoraka B, dok su postupkom PACVD na Fakultetu strojarstva i brodogradnje nanesene višeslojna prevlaka PACVD TiN/TiCN (skupina C) i PACVD TiN/TiBN (skupina D). Skupine uzoraka C i D su prije prevlačenja nitrirane u plazmi. U ispitivanjima korištena su dva nazivna promjera svrdala iz svih skupina, A, B, C, D, a to su 5 mm i 8 mm. Stanja svrdala prije početka ispitivanja navedena su u tablici 5.

Tablica 5. Tablica stanja svrdala prije ispitivanja

Skupina uzoraka	Promjer svrdla [mm]	Naziv ispitnog uzorka	Toplinska obrada
A	5	A5	-
	8	A8	
B	5	B5	Prevlaka PVD TiN
	8	B8	
C	5	C5	Nitiranje u plazmi + PACVD TiN/TiCN
	8	C8	
D	5	D5	Nitiranje u plazmi + PACVD TiN/TiBN
	8	D8	

Tablica 6. Parametri PACVD prevlačenja

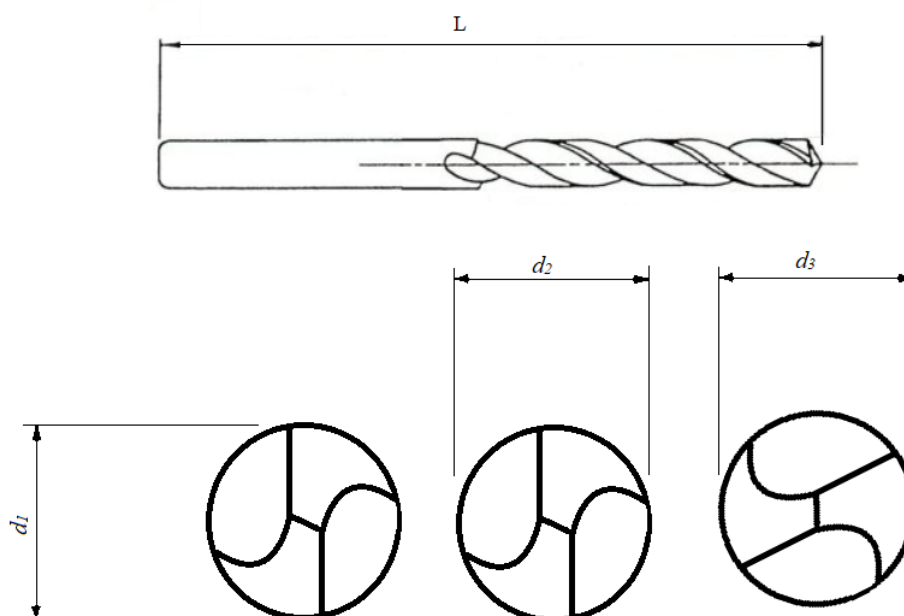
Parametar	Otprašivanje	PACVD TiN	PACVD TiCN	PACVD TiBN
Napon, U	520	490	490	560
Snaga, W	900	1650	1400	1650
Vrijeme, h	1	1,5	6	10
Temperatura, °C	420	500	500	500
Tlak, mbar	2	2	2	2
N₂, l/h	23	15	13	0
H₂, l/h	140	140	140	140
Ar, l/h	10	10	10	7
CH₄, l/h	0	0	4,5	0
Ti₄Cl, l/h	0	3	3	3
BCl₃, l/h	9	0	0	9

Prije samog početka bušenja, izmjeren je promjer oštrica na vrhu svrdla kako bi se trošenje moglo pratiti kroz proces. Ukupno je 8 ispitnih uzoraka, odnosno dva svrdla različitih promjera iz četiri skupine.

5.2. Mjerenje početnih dimenzija svrdala

Mjerenje dimenzija ispitnih uzoraka provedeno je u Laboratoriju za precizna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Kao relevantne dimenzije odabrane su ukupna duljina svrdla (L) i promjeri u tri točke (d_1 , d_2 i d_3), kako je prikazano na slici 18. Mjera d_1 je udaljenost između krajeva glavnih reznih oštrica, odnosno kutova glavnih bridova, d_2 je međusobna udaljenost kuteva stražnjih oštrica, a d_3 je promjer koji se nalazi između glavnih kutova i kutova stražnjih oštrica. Izmjerene početne vrijednosti svrdala navedene su u tablici 6.

Mjerenje duljina svrdala L izvršeno je pomičnim mjerilom s točnošću od $\pm 0,01$ mm, dok su promjeri izmjereni s mikrometrom s točnošću od $\pm 0,001$ mm.



Slika 18. Mjerene dimenzije svrdala

Tablica 7. Početne dimenzije svrdala

Skupina uzoraka	Nazivni promjer svrdla [mm]	Izmjerene vrijednosti [mm]			
		d_1	d_2	d_3	L
A	5	5,010	4,860	4,890	85,20
	8	7,997	7,898	7,757	115,02
B	5	4,988	4,972	5,042	86,48
	8	7,969	7,602	7,553	116,48
C	5	5,012	4,898	4,999	85,00
	8	7,840	7,795	7,835	116,58
D	5	5,009	4,948	4,985	86,40
	8	7,960	7,740	7,650	117,06

5.3. Priprema pokusa

Pokus se sastoji od bušenja aluminijskog profila debljine stijenke od 2,3 mm ($\pm 0,1$ mm), a zamišljen je tako da se sa svakim svrdlom izradi 15 provrta, te da se nakon svakih 5 izrađenih provrta vrh svrdla fotografira radi vizualne evaluacije trošenja.

5.3.1. Ulazne i izlazne veličine pokusa

Glavna sila bušenja, broj okretaja i vrijeme bušenja

Samo bušenje izvršeno je pomoću stupne bušilice Bosch PBD 40, snage 710 W, prikazane na slici 19. na čije je postolje položena vaga na koju će pri bušenju biti položen škripac s obratkom. Vaga pri bušenju služi radi održavanja konstantne sile bušenja, a ona u ovom pokusu iznosi 100 N. Vrijeme od početka do kraja bušenja mjeri se štopericom.

Bušilicu je moguće podesiti da održava konstantan broj okretaja ili konstantan zakretni moment. Za ovaj rad odabran je konstantna brzina od 1000 okretaja po minuti (min^{-1}).



Slika 19. Stupna bušilica Bosch PBD 40 [21]

Temperatura svrdla, napon mreže i jakost struje

Pri bušenju se prati temperatura svrdla pirometrom koji bilježi maksimalnu temperaturu svrdla po završetku bušenja i pri vađenju svrdla iz obratka, a također se prati i jakost struje koju bušilica vuče iz mreže. Napon mreže očitava se prije početka bušenja (228 V). To se čini pomoću multimetra UNI-T UT202A. Pirometar i multimetar prikazani su na slici 20.



Slika 20. Multimetar (lijevo) i pirometar (desno) [22 i 23]

Tvrdoća osnovnog materijala

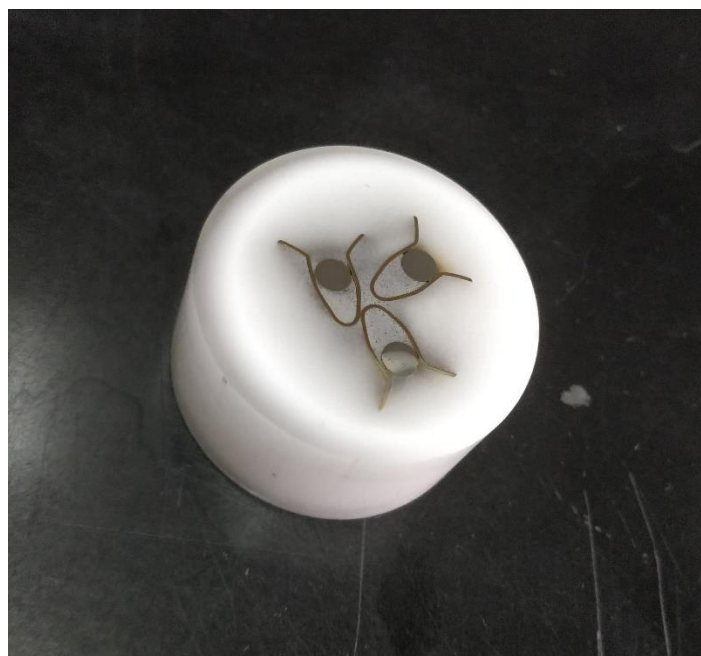
Tvrdoća osnovnog materijala je pomoću tvrdomjera na Fakultetu strojarstva i brodogradnje izmjerena na dva svrdla nazivnog promjera 8 mm. U tablici 7 prikazane su vrijednosti tvrdoće korigirane za +2,5 HRC zbog utjecaja zakrivljenosti svrdla promjera 8 mm. Izvršeno je 5 mjerenja po uzorku. Zaključak je da prevlaka ne utječe na tvrdoću mjerenu Rockwell C metodom.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja tvrdoće osnovnog materijala

Uzorak	Izmjerene vrijednosti tvrdoće					
Redni broj mjerenja	1	2	3	4	5	Srednja vrijednost
A8	60,5	57,5	55,5	61,5	60,5	59,1
B8	55,5	57,5	56,5	57,5	54,5	56,3

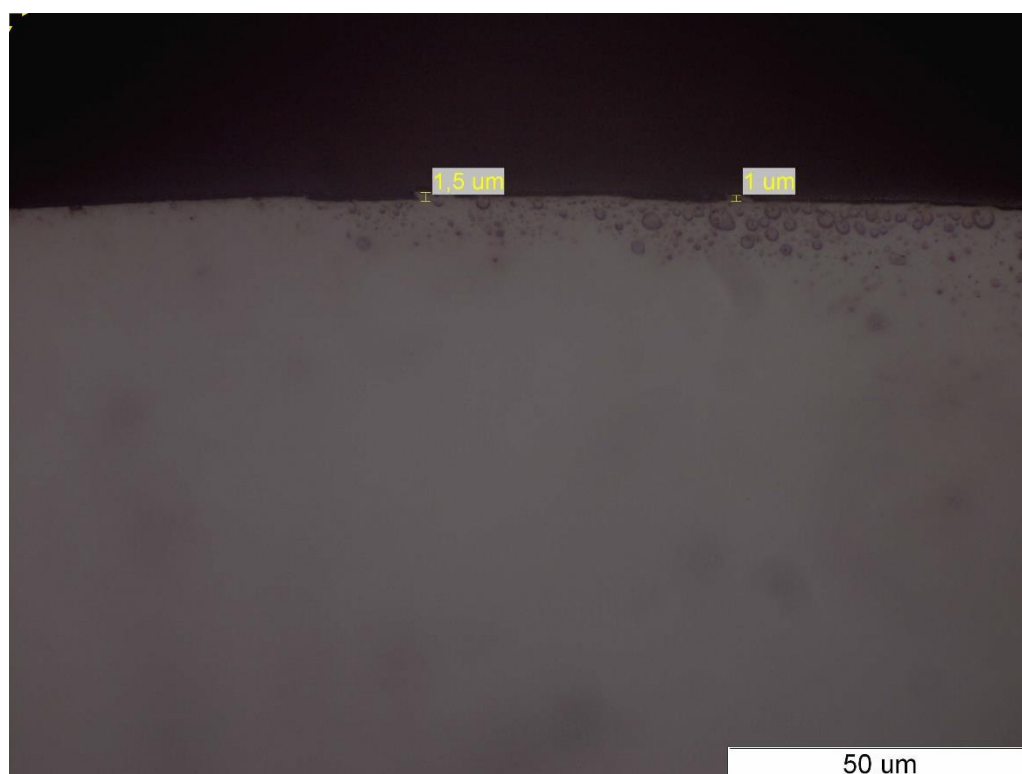
Debljina prevlake

Debljina prevlake određena je pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51. Iz svake ispitne skupine prevučenih svrdala odabrano je po jedno svrdlo koje je potom prerezano i uliveno u polimernu masu, nakon čega je uslijedilo brušenje. Uzorak je prikazan na slici 21.



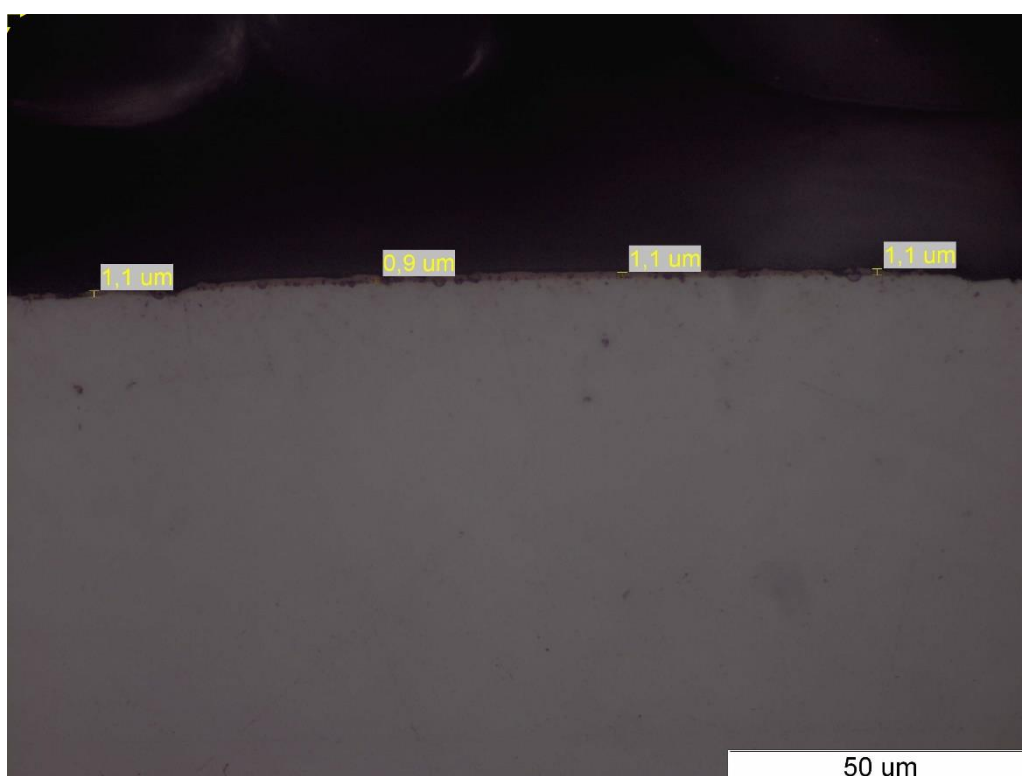
Slika 21. *Uzorak za ispitivanje debljine prevlake*

Pri određivanju debljine prevlake korišteno je povećanje x1000, a rezultati za uzorka skupine B su vidljivi na slici 22. Kod TiN prevlake velik je dio prevlake otkinut pri brušenju, pa sloj nije jasno vidljiv kao u slučaju sljedeća dva uzorka, međutim, prevlaka je nađena i rezultat je vidljiv na slici, debljina prevlake iznosi između 1 i 1,5 μm .



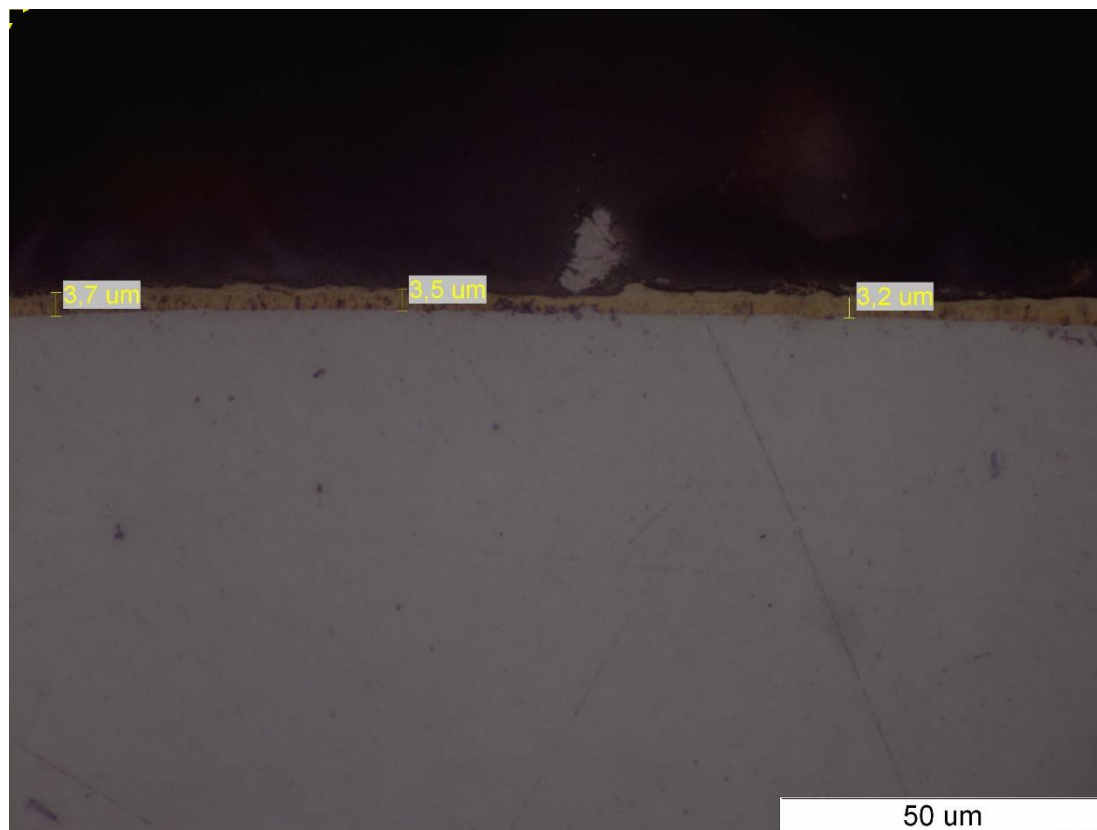
Slika 22. *Određivanje debljine prevlake TiN*

Na slici 23 nalazi se izgled sloja TiCN, odnosno ispitne skupine C. Debljina prevlake iznosi između 0,9 i 1,1 μm .



Slika 23. *Određivanje debljine prevlake TiCN*

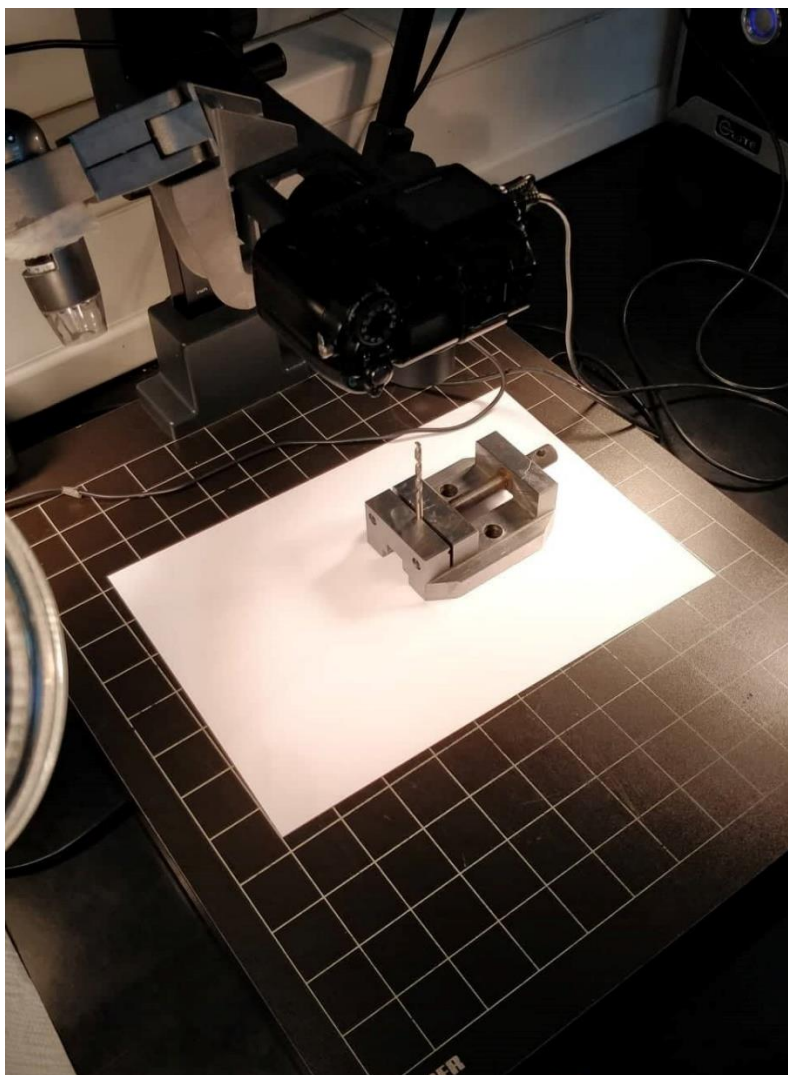
Posljednji sloj za ispitivanje je TiBN, skupina D, a rezultati se nalaze na slici 24. Prevlaka je vrlo jasno vidljiva i uvjerljivo deblja od prethodna dva uzorka.



Slika 24. *Određivanje debljine prevlake TiBN*

Izgled površine

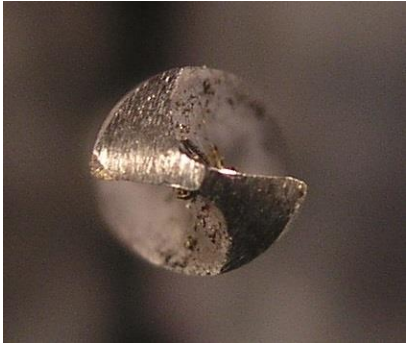

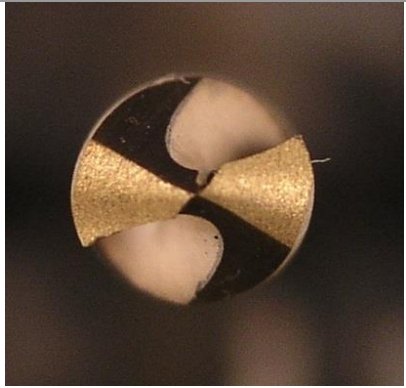
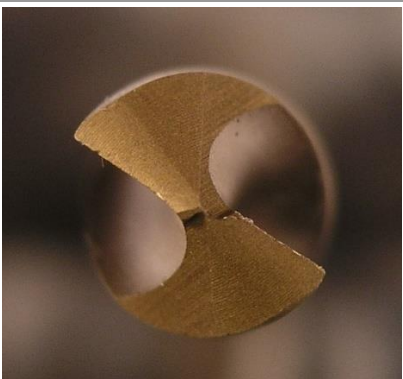


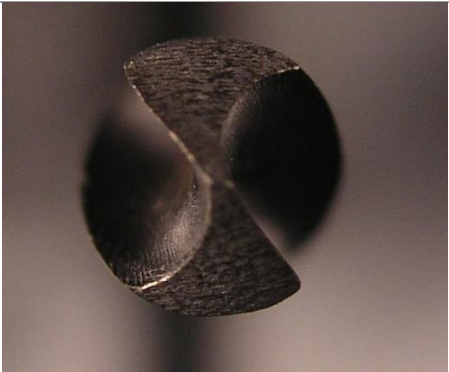
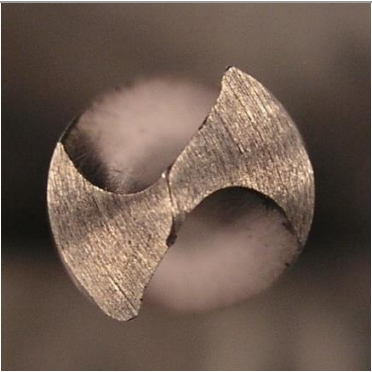
Prije početka samog pokusa fotografirana su početna stanja površina svrdala radi usporedbe s kasnijim fotografijama. Ispitni uzorci fotografirani su Olympus digitalnim fotoaparatom prikazanim na slici 25.



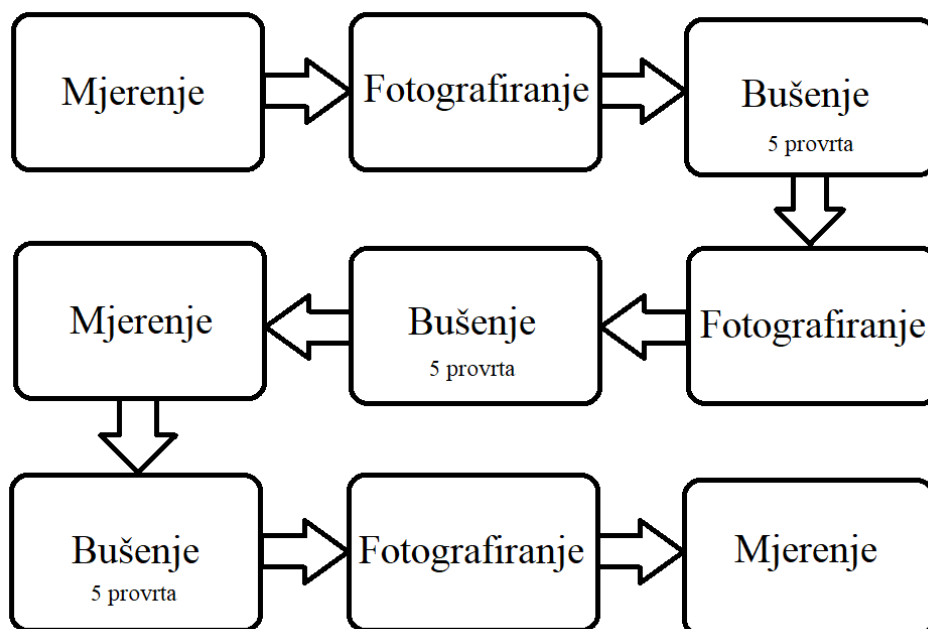
Slika 25. *Fotografiranje trošenja oštrica svrdala*

Dobivene fotografije nalaze se u tablici 8. Prikazano je svih 8 ispitnih uzoraka. Vidljivo je da su prevlake netaknute, a ispod prevlaka naziru se i tragovi brušenja nastali u proizvodnom procesu pri oblikovanju i oštrenju.

Tablica 9. Početno stanje površina svrdala

Skupina uzoraka	Izgled površine	
	5 mm	8 mm
A		
		
C		
		

Fotografiranje svrdala označilo je završetak pripremne faze pokusa, a time i početak samog pokusa. Shematski prikaz plana pokusa prikazan je na slici 26. Sve ulazne i izlazne veličine ovog procesa navedene su u tablici 9.



Slika 26. Shematski prikaz plana pokusa

Tablica 10. Ulazne i izlazne veličine procesa

Ulazne veličine procesa	Izlazne veličine procesa
Nazivni promjer svrdla, d	Promjena promjera vrha svrdla, $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3$
Početna duljina svrdla, L	Promjena duljine svrdla, ΔL
Promjer vrha svrdla, d_1, d_2, d_3	Izgled oštrica svrdla, V
Vrsta prevlake, $PACVD$	Temperatura vrha svrdla nakon završetka bušenja, ϑ
Debljina prevlake, e	Snaga bušenja, P
Vrsta materijala obratka, O (Aluminij)	
Debljina obratka, h (2,3 mm)	
Broj okretaja pri bušenju, n (1000 min ⁻¹)	
Početna temperatura obratka, ϑ_0 (30 °C)	
Glavna sila bušenja, F_p (100 N)	
Napon mreže, U (228V)	
Broj izbušenih rupa, N	
Vrijeme bušenja, s/Posmak, s	

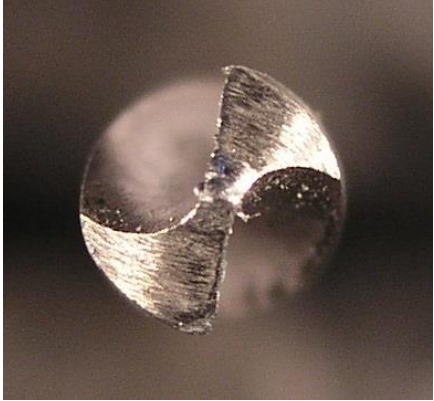
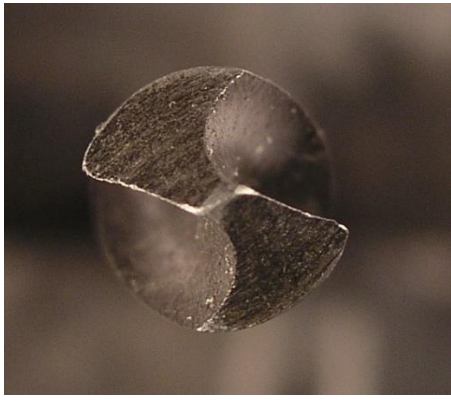
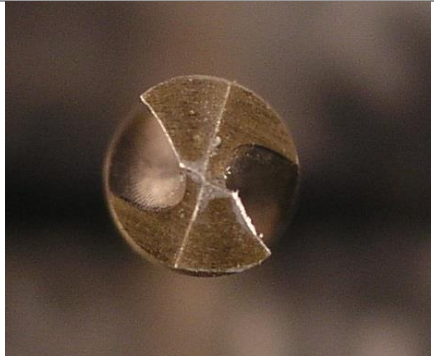
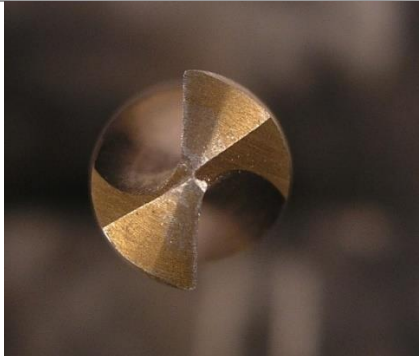
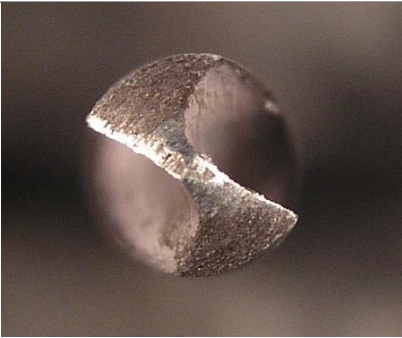
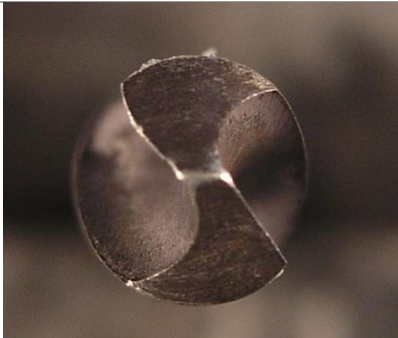

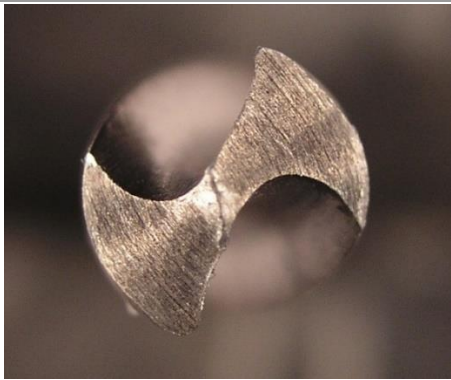
6. REZULTATI TROŠENJA

Pokus počinje ispitnim uzorkom A5, odnosno neprevučeni svrdlom nazivnog promjera 5 mm. Izrađeno je 5 provrta pri čemu je praćeno vrijeme bušenja, temperatura svrdla na ulazu svrdla u obradak, jakost struje i kontrolirana je konstantna sila bušenja pomoću vage. Zatim se pokus nastavlja s ispitnim uzorkom A8. Proces se ponavlja s preostalim skupinama uzoraka B, C i D. Po završetku bušenja prvih 5 provrta sa svih 8 ispitnih uzoraka, slijedi ponovno fotografiranje površine reznih oštrica svrdala. Rezultati su vidljivi u tablici 10.

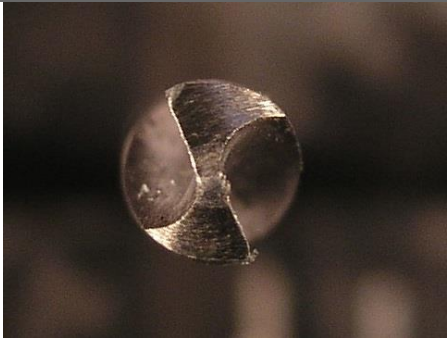

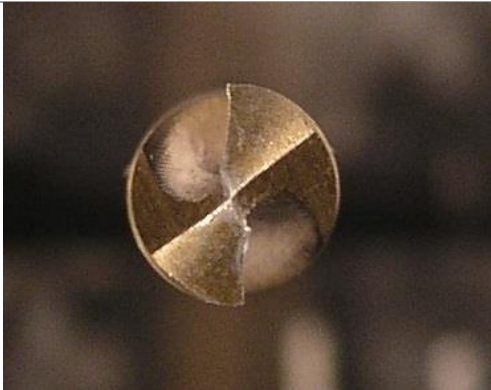

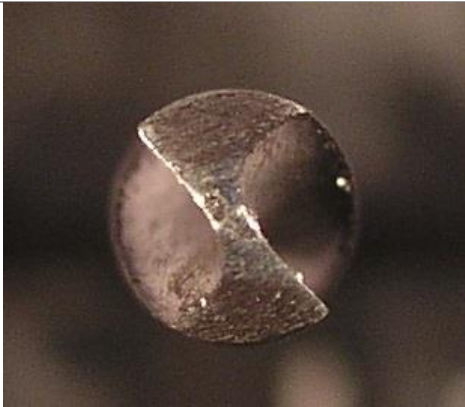
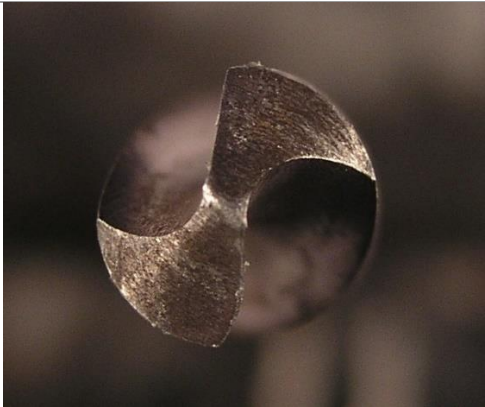

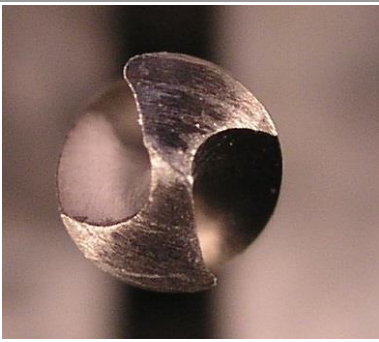
Na svim svrdlima vidljivo je zatupljenje samog vrha, odnosno poprečne oštrice. Na uzorcima B5 i B8 najbolje je vidljiva oštećena prevlaka i osnovni materijal ispod prevlake, dok se na uzorku C5 vide najveća oštećenja. Sami rezultati tog ispitnog uzorka pokazuju ekstremno dugo vrijeme bušenja od 1027 sekundi (prilog 3). Iz tog razloga samo je jedan provrt izrađen s tim svrdlom. Razlog takvog rezultata može biti pojava iskrenja prilikom postupka prevlačenja uzorka čime se zaoblio sam vrh svrdla i time zatupila poprečna oštrica. Poprečna oštrica za probijanje u materijal obratka u početku bušenja, a pošto je ona zatupljena, ono što se događalo na mjestu kontakta alata i obratka nije obrada odvajanjem čestica koliko obrada deformiranjem. Nakon vizualne evaluacije trošenja, svrdla se ponovno podvrgavaju procesu bušenja 5 provrta, nakon čega se ponovno fotografiraju.

Po završetku drugog ciklusa bušenja, slijedi ponovno mjerenje svih dimenzija svrdala (d_1 , d_2 , d_3 i L). Ovim se korakom može vidjeti trend trošenja pojedinog svrdla. Moguće je zaključiti koje je svrdlo, odnosno koja prevlaka, bolje podnijelo dosadašnji tijek ispitivanja. Dobiveni rezultati nalaze se u tablici 13. Također, rezne oštrice se ponovo fotografiraju radi vizualne evaluacije. Ispitni uzorak C5 nakon prvog provrta nije više korišteno, ali prikazano je na slici s ostalim ispitnim uzorcima radi usporedbe. Stanje površine nakon ukupno 10 provrta vidljivo je u tablici 11.

Tablica 11. Stanje površina svrdala nakon izrađenih 5 provrta


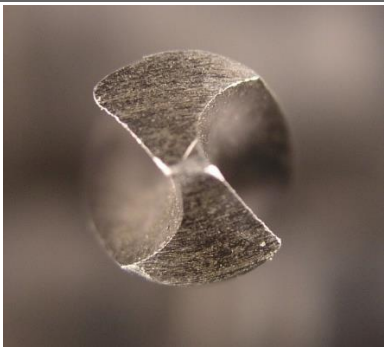
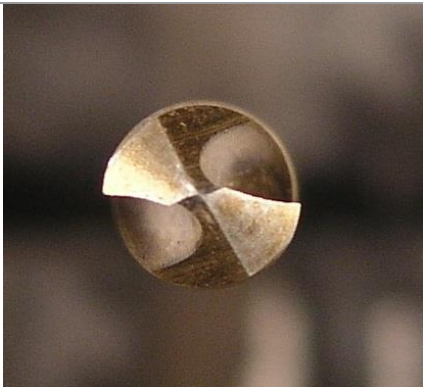
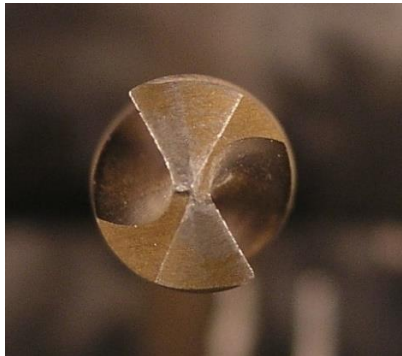
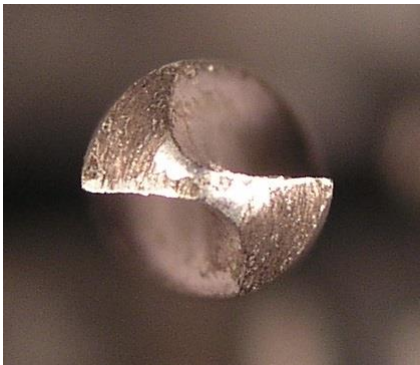
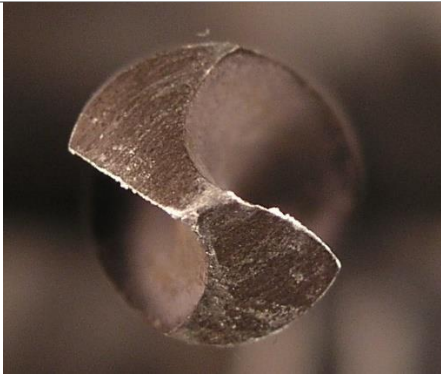


Skupina uzoraka	Izgled površine	
	5 mm	8 mm
A		
		
C		
		

Tablica 12. Stanje površina svrdala nakon izrađenih 10 provrta

Skupina uzoraka	Izgled površine	
	5 mm	8 mm
A		
B		
C		
D		

Posljednji ciklus bušenja sastoji se također od 5 provrta, nakon čega ponovno slijedi fotografiranje površina i završno mjerenje. U tablici 13 navedene su kumulativne vrijednosti promjene dimenzija svrdala nakon izrađenih 10 i 15 provrta. Od izmjerenih vrijednosti oduzimaju se početne izmjerene vrijednosti navedene u tablici 6, dok su apsolutne izmjerene vrijednosti navedene su u prilogu 6. Završno stanje reznih površina svrdala nakon izrađenih 15 provrta prikazano je u tablici 12. Kao i na prethodnom prikazu stanja reznih oštrica, pridružen je i ispitni uzorak C5 radi usporedbe.

Tablica 13. Završno stanje površina svrdala nakon izrađenih 15 provrta

Skupina uzoraka	Izgled površine	
	5 mm	8 mm
A		
		
C		
		

Tablica 14. Kumulativne vrijednosti promjena dimenzija svrdala

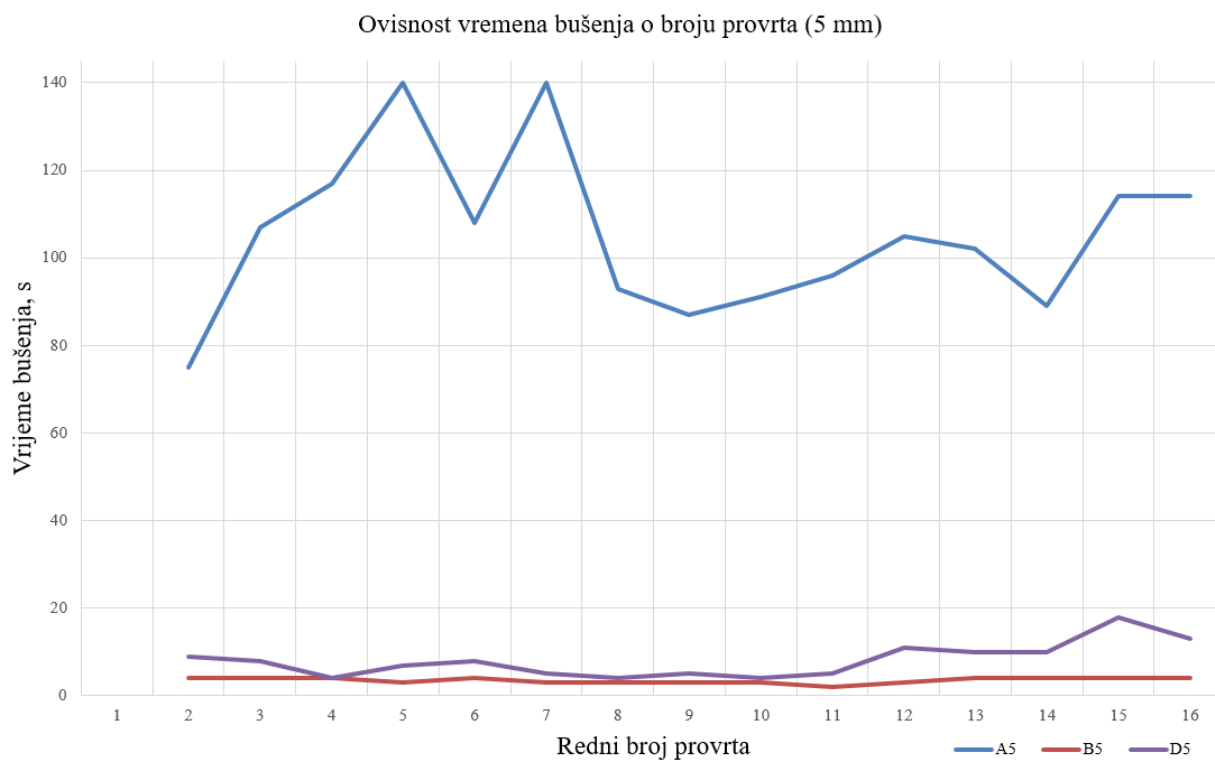
	Izračunate vrijednosti							
Redni broj mjerenja	Naziv ispitnog uzorka							
	A5				A8			
	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL
1	-0,07	-0,089	-0,145	-0,02	-0,042	-0,033	-0,027	-0,04
2	-0,142	-0,145	-0,180	-0,04	-0,082	-0,133	-0,032	-0,06
Redni broj mjerenja	Naziv ispitnog uzorka							
	B5				B8			
	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL
1	-0,076	-0,202	-0,031	-0,06	-0,031	-0,197	-0,091	-0,08
2	-0,093	-0,217	-0,050	-1,12	-0,081	-0,214	-0,128	-0,14
Redni broj mjerenja	Naziv ispitnog uzorka							
	C5				C8			
	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL
1	-0,013	-0,068	-0,104	0,00	-0,090	-0,037	0,000	0,10
2	-0,062	-0,093	-0,154	0,00	-0,155	-0,090	-0,010	0,16
Redni broj mjerenja	Naziv ispitnog uzorka							
	D5				D8			
	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL	Δd_1	Δd_2	Δd_3	ΔL
1	-0,001	-0,010	-0,097	0,00	-0,005	-0,010	0,000	0,24
2	-0,005	-0,023	-0,110	0,00	-0,020	-0,012	0,000	0,24

Slika 27 prikazuje stanje vršnih kutova svrdala. Odabrana su svrdla većeg nazivnog promjera (8 mm) radi preglednosti.

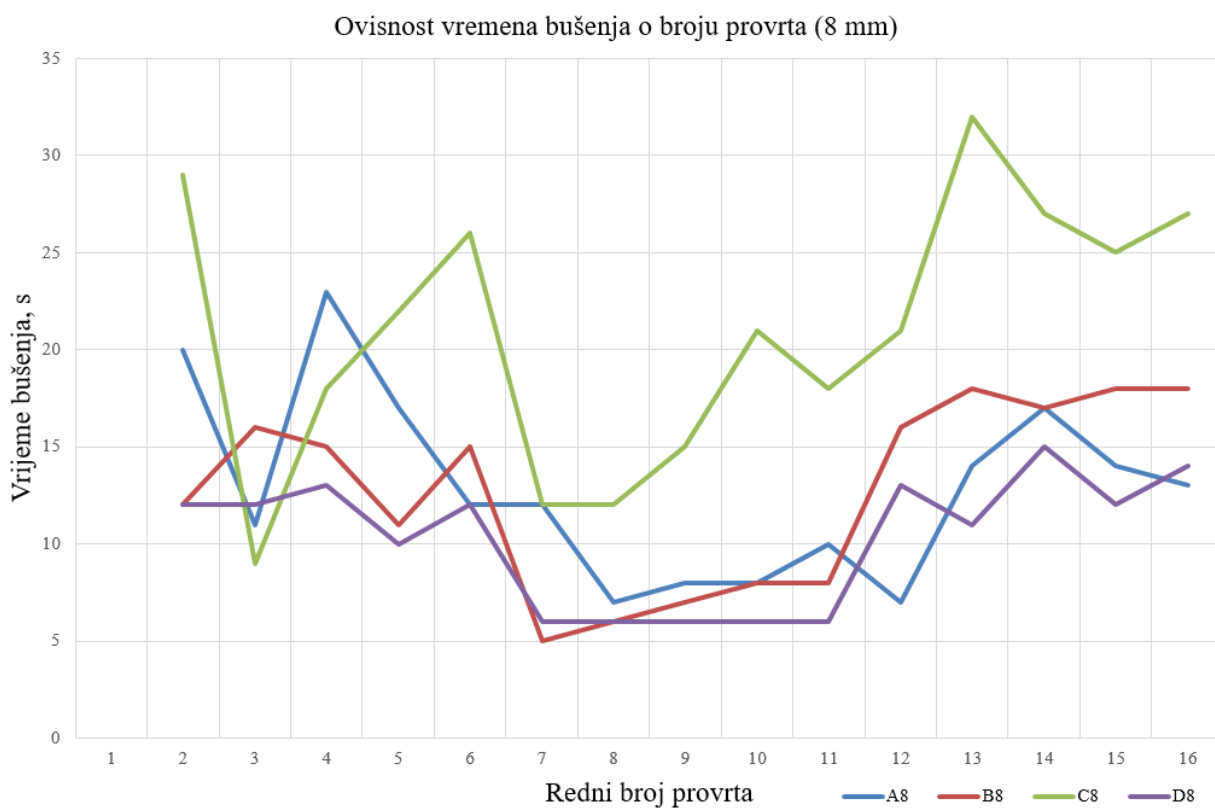


Slika 27. Stanje vršnih kutova nakon provedenog pokusa

Na slikama 28 i 29 prikazani su dijagrami ovisnosti vremena bušenja o rednom broju provrta. Radi preglednosti i zbog drastičnih odstupanja od ostalih rezultata na slici 27 prethodno spomenuti ispitni uzorak C5 nije uzet u obzir.

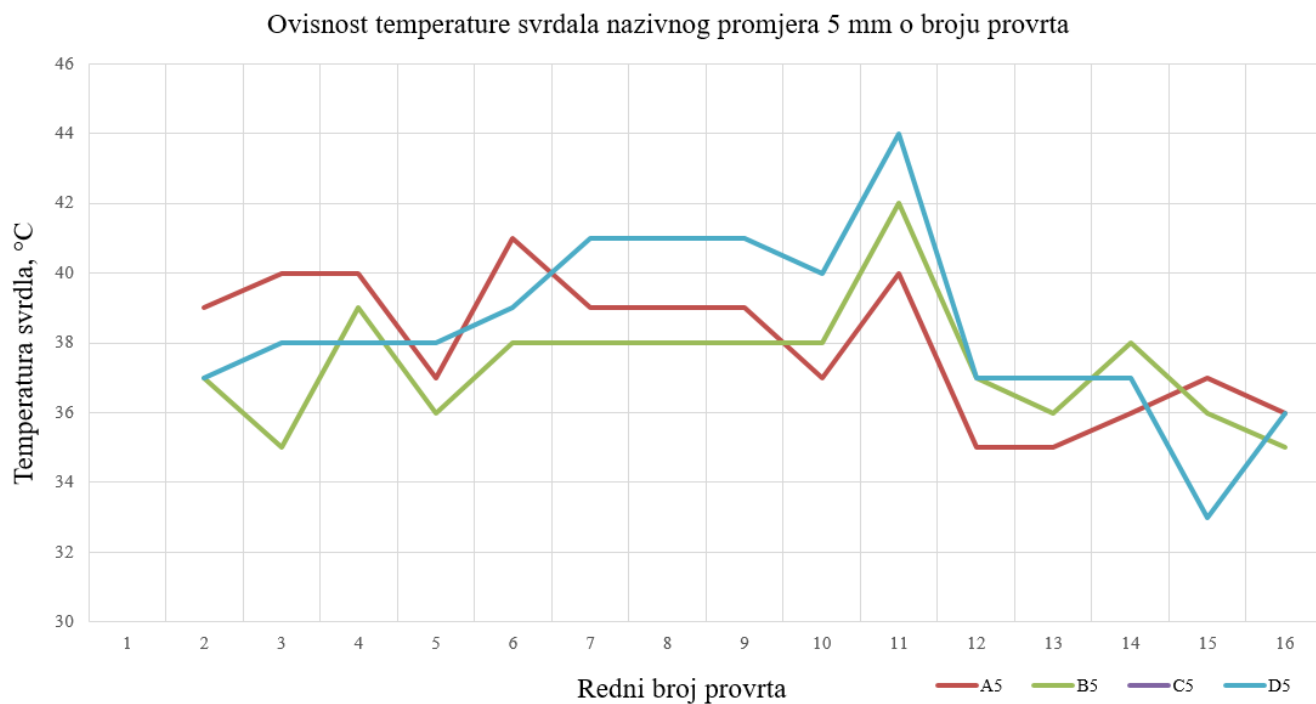


Slika 28. Dijagram ovisnosti vremena bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 5 mm

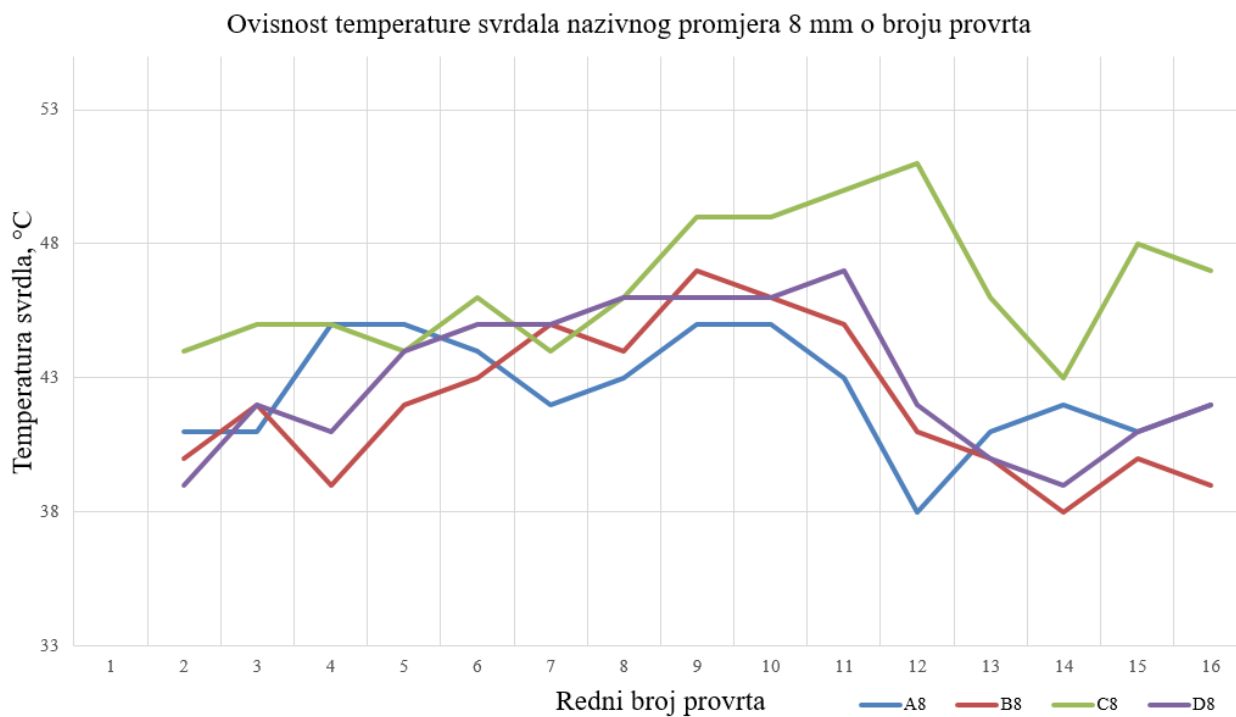


Slika 29. Dijagram ovisnosti vremena bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 8 mm

Na slikama 30 i 31 prikazani su dijagrami ovisnosti temperature i broja provrta.

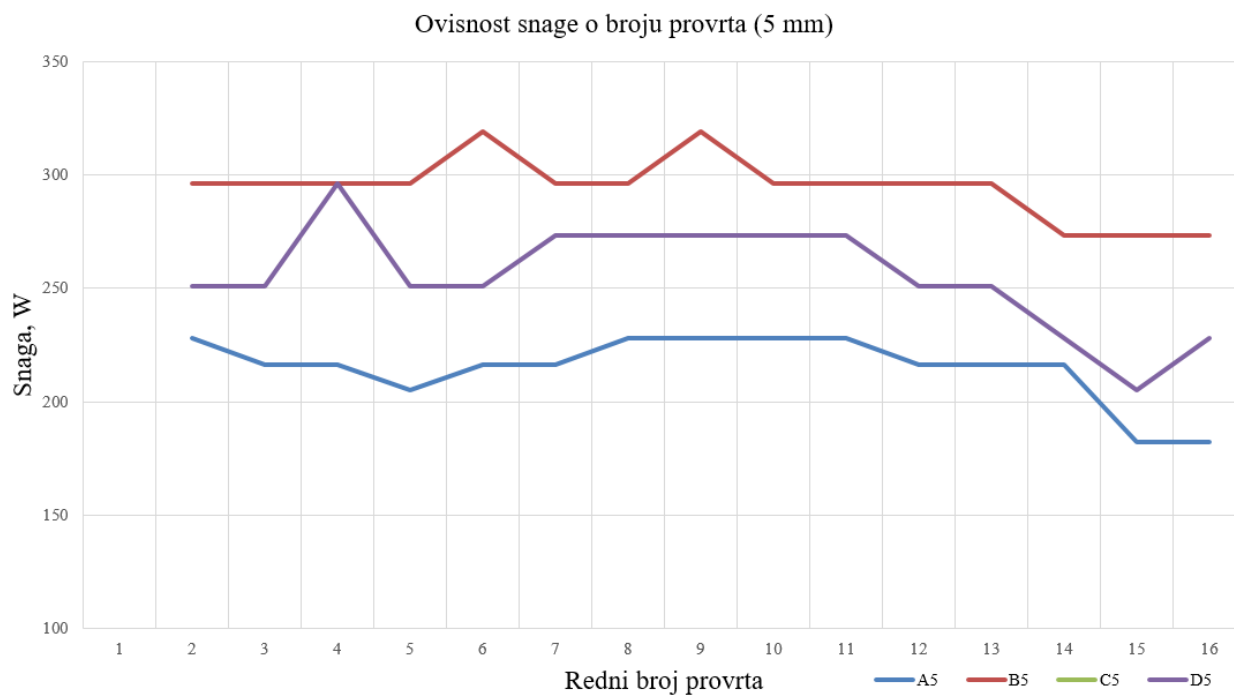


Slika 30. Dijagram ovisnosti temperature bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 5 mm

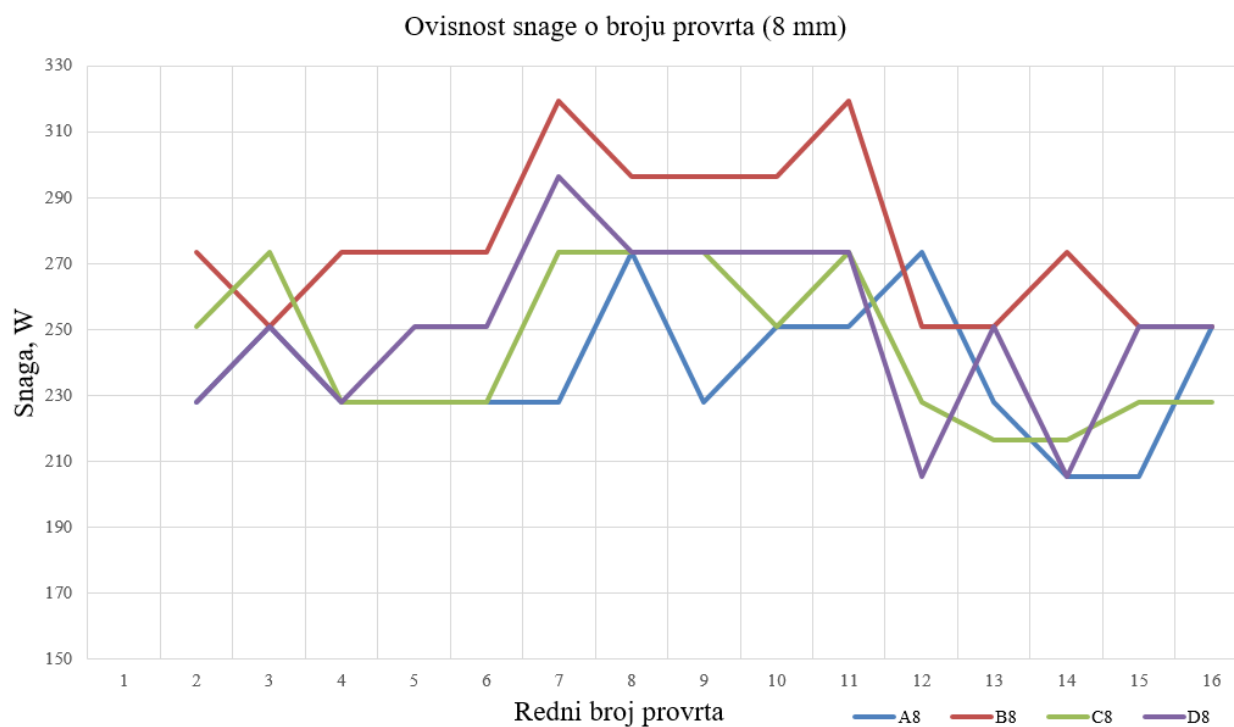


Slika 31. Dijagram ovisnosti temperature bušenja o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 8 mm

Na slikama 32 i 33 prikazani su dijagrami ovisnosti snage o broju provrta za eksperimente sa svrdlima nazivnih promjera 5 i 8 mm.



Slika 32. Dijagram ovisnosti snage o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 5 mm



Slika 33. Dijagram ovisnosti snage o broju provrta za svrdla nazivnog promjera 8 mm

7. DISKUSIJA REZULTATA

Prema slici 28 moguće je zaključiti kako su prevučena svrdla imala značajno bolji učinak u vidu vremena bušenja, posebno B5 s prosječnim vremenom bušenja od 3,5 sekundi. Uzorak D5 ostvaruje prosječno vrijeme od 8,1 sekundi, u odnosu na neprevučeni uzorak A5, koji je prosječno bušio 105,2 sekundi. Kao što je to prethodno objašnjeno, uzorak C5 je zbog velikih razlika u vremenu bušenja u odnosu na ostale uzorke promjera 5 mm (1027 s) izuzet iz usporedbe. Provedeno je samo jedno bušenje provrta uzorkom C5 jer je ocijenjeno kao neupotrebljivo.

Kod uzoraka nazivnog promjera 8 mm međusobna odstupanja su manja, uzorci A8, B8 i D8 sa srednjim vrijednostima bušenja nalaze se u intervalu između 10,3 i 12,7 sekundi. Najmanje vrijeme bušenja ostvaruje uzorak D8, dok uzorak C8 značajno odstupa od ostalih uzoraka nazivnog promjera 8 mm sa svojih 20,9 sekundi, što je vidljivo i na slici 29. Dakle, skupina uzoraka C ima lošiji rezultat od ostalih uzoraka. U tablici 15 prikazane su sve srednje vrijednosti izlaznih veličina izmjerenih u pokusu.

Tablica 15. Srednje vrijednosti mjerenih izlaznih veličina

Ispitni uzorak	Srednja vrijednost vremena bušenja, s	Srednja vrijednost temperature bušenja, °C	Srednja vrijednost snage bušenja, W
A5	105,2	38,0	215
A8	12,2	42,5	237
B5	3,5	37,4	295
B8	12,7	42,1	277
C5	1027,0	37,0	194
C8	20,9	46,5	245
D5	8,1	38,5	255
D8	10,3	43,0	251

Na slici 30 vidljivi su trendovi zagrijavanja svrdala nazivnog promjera 5 mm. Nisu uočena značajna odstupanja u zagrijavanju svrdala. Srednje vrijednosti navedene su u tablici 15. Kod uzoraka nazivnog promjera 8 mm vidljivo je odstupanje uzorka C8 od ostalih uzoraka. Na slici 31 očito je da C8 s prosječnom temperaturom zagrijavanja od 46,5 °C odstupa od ukupnog trenda zagrijavanja. Značajnija odstupanja u temperaturi počinju nakon provrta broj 9.

Slika 32 prikazuje dijagram snage bušenja. Očito je da najviše snage iz mreže zahtijeva uzorak B5, zatim D5, pa onda A5. Za uzorak C5 je na temelju jednog provrta nemoguće odrediti trend trošenja električne snage. Na slici 33 vidljivo je da se krivulje snage uzoraka nazivnog promjera 8 mm isprepliću, što ukazuje na manje značajne razlike u trošenju snage uz mreže nego je to slučaj kod uzoraka promjera 5 mm. Prema srednjih vrijednostima moguće je zaključiti da u obje skupine uzoraka najviše snage troše uzorci ispitne skupine B, dok najmanje troše neprevučeni uzorci, odnosno uzorci skupine A, ako ponovno izuzmemo rezultat jednog bušenja uzorkom C5.

8. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno ispitivanje otpornosti na trošenje na 4 skupine ispitnih uzoraka. Ispitni uzorci su komercijalno dobavljiva svrdla od 5 mm i 8 mm. Skupina ispitnih uzoraka A nije naknadno modificirana i pokus je proveden s neprevučanim svrdlima. Skupina uzoraka B sastoji se od PVD TiN svrdala. Skupine uzoraka C i D prvo su nitrirane u plazmi, a zatim je nanosena PACVD prevlaka. Za skupinu C, to je višeslojna prevlaka TiN/TiCN, a za D je to višeslojna prevlaka TiN/TiBN. Kod ispitnih uzoraka skupina B, C i D provedeno je ispitivanje debljine, a vrijednosti su sljedeće:

- Skupina B: $e = 1...1,5 \mu\text{m}$
- Skupina C: $e = 0,9...1,1 \mu\text{m}$
- Skupina D: $e = 3,2...3,7 \mu\text{m}$

Nakon provedenih ispitivanja koja su se sastojala od bušenja 15 provrta po ispitnom uzorku moguće je zaključiti da parametri ovog pokusa pogoduju određenim stanjima površine više nego drugima. Odabrana je konstantna sila bušenja od 100 N i konstantan broj okretaja od 1000 min^{-1} . Postoje razlike između promjera unutar iste skupine ispitnih uzoraka, kao i razlike učinaka različitih stanja površina kod svrdala istih nazivnih promjera.

Prevučena svrdla su, gledajući prosječne vrijednosti vremena bušenja, ostvarila značajno bolji učinak u odnosu na neprevučena svrdla i izuzev uzorka C5. Skupina ispitnih uzoraka C ostvarila je lošiji rezultat u odnosu na ostale skupine. Razlog tome je moguće zaobljenje i zatupljenje samog vrha svrdla, odnosno poprečne oštrice, tijekom postupka prevlačenja, što otežava inicijalno prodiranje u materijal obratka.

Nisu uočena značajna odstupanja u zagrijavanju svrdala unutar iste ispitne skupine ili skupine svrdala jednakih nazivnih promjera. Svrdla ispitne skupine B pokazala su najveću potrošnju električne snage, a svrdla ispitne skupine A najmanju.

Kod ispitnih uzoraka A8, B8 i D8 vidljivo je smanjenje vremena bušenja između provrta 7 i 11 što može biti rezultat oštrenja svrdla. Nakon zatupljenja i trošenja prevlake, daljnjim bušenjem dolazi se do osnovnog materijala koji je zbog nanosene prevlake ostao sačuvan i naoštren.

U daljnjim ispitivanjima preporučuje se daljnje ispitivanje svrdala kao i karakterizacija nanosenih prevlaka.

LITERATURA

- [1] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.; „*Svojstva i primjena materijala*“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Filetin T.; „*Izbor materijala pri razvoju proizvoda*“, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [3] Pippel, E.; Woltersdorf, J.; Pöckl, G.; Lichtenegger, G.; „*Microstructure and Nanochemistry of Carbide Precipitates in High-Speed Steel S 6-5-2-5*“, Materials characterization, 1999.
- [4] Gojić, M.; „*Površinska obradba materijala*“, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [5] Filetin T.; Grilec T.; „*Postupci modificiranja i prevlačenja površina*“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Fakultete strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [6] Eskildsen S.S.; Mathiasen C.; Foss M.; „*Plasma CVD: process capabilities and economic aspects*“, Danish Technological Institute, Denmark, 1999.
- [7] URL 1: <http://proizvodno-strojarstvo.blogspot.hr/2011/09/postupci-cvd-chemical-vapour-deposition.html>
- [8] Choy, K.L.; „*Chemical vapour deposition of coatings*“, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 2001.
- [9] Cajner, F.; Landek, D.; Kovačić, S.; „*Introduction and application of new technologies of plasma nitriding and PACVD coating*“, Proc. 5th Int. Conf. Mechanical Technol. Struct. Mater., 2015.
- [10] Matić, A.; „*Utjecaj prethodne toplinske obrade na svojstva PACVD prevlake TiN/TiCN*“, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [11] Matijević, B.; Stupnišek, M.; „*Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala*“, Zbornik radova znanstveno stručnog skupa s međunarodnim učešćem, Zagreb, 2000.
- [12] Kovačić, S.; „*Utjecaj nitriranja i prevlačenja na svojstva alatnih čelika za topli rad*“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [13] URL 2: <http://www.titaniumexposed.com/titanium-nitride-coating.html>
- [14] URL 3: http://www.expo21xx.com/metalworking/20535_st2_metalworking-tools/default.htm
- [15] Škorić, S.; „*Osnove tehnologije I – Predavanja*“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [16] Rebec, B.; „*Rezni alati*“, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1973.

- [17] URL 4: Autor Mmarre - Vlastiti crtež, Javno vlasništvo, <https://hr.wikipedia.org/w/index.php?curid=331599>
- [18] Filetin, T.; „Izbor materijala – Predavanja“; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [19] SANDVIK Coromant Rotating Tools, katalog alata, 2015.
- [20] Kučić-Mirković, S.; „Režimi obrade“; Tehnička škola za strojarstvo i brodogradnju, Rijeka, 2015.
- [21] URL 5: <http://team-media.hr/dom-i-vrt/alati/stupne-busilice/bosch-pbd-40-tischbohrmaschine-saeulenbohrmaschine.html>
- [22] URL 6: <https://www.aliexpress.com/item/UNI-T-UT202A-Digital-Clamp-Multimeter-400A-600A-AC-DC-Voltmeter-AC-Current-Meter-Resistance-Multi/32606951298.html>
- [23] URL 7: <https://bazaar.hr/mjeraci-temperature/infracrveni-termometar-voltcraft-ir1600-cam-optika-501-50-do-1600-c-pirometar-prikaz-realne-slike-oglas-654121>

PRILOZI

Prilog 1. Rezultati bušenja svrdlima iz skupine uzoraka A

Skupina uzoraka A					Napon U=228 V			
Redni broj provrta	Temperatura bušenja [°C]		Broj okretaja [min ⁻¹]		Jakost struje [A]		Vrijeme bušenja [s]	
	Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla	
	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm
1	39	41	1000	1000	1,00	1,00	75	20
2	40	41	1000	1000	0,95	1,10	107	11
3	40	45	1000	1000	0,95	1,00	117	23
4	37	45	1000	1000	0,90	1,00	140	17
5	41	44	1000	1000	0,95	1,00	108	12
6	39	42	1000	1000	0,95	1,00	140	12
7	39	43	1000	1000	1,00	1,20	93	7
8	39	45	1000	1000	1,00	1,00	87	8
9	37	45	1000	1000	1,00	1,10	91	8
10	40	43	1000	1000	1,00	1,10	96	10
11	35	38	1000	1000	0,95	1,20	105	7
12	35	41	1000	1000	0,95	1,00	102	14
13	36	42	1000	1000	0,95	0,90	89	17
14	37	41	1000	1000	0,80	0,90	114	14
15	36	42	1000	1000	0,80	1,10	114	13

Prilog 2. Rezultati bušenja svrdlima iz skupine uzoraka B

Skupina uzoraka B					Napon U=228 V			
Redni broj provrta	Temperatura bušenja [°C]		Broj okretaja [min ⁻¹]		Jakost struje [A]		Vrijeme bušenja [s]	
	Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla	
	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm
1	37	40	1000	1000	1,30	1,20	4	12
2	35	42	1000	1000	1,30	1,10	4	16
3	39	39	1000	1000	1,30	1,20	4	15
4	36	42	1000	1000	1,30	1,20	3	11
5	38	43	1000	1000	1,40	1,20	4	15
6	38	45	1000	1000	1,30	1,40	3	5
7	38	44	1000	1000	1,30	1,30	3	6
8	38	47	1000	1000	1,40	1,30	3	7
9	38	46	1000	1000	1,30	1,30	3	8
10	42	45	1000	1000	1,30	1,40	2	8
11	37	41	1000	1000	1,30	1,10	3	16
12	36	40	1000	1000	1,30	1,10	4	18
13	38	38	1000	1000	1,20	1,20	4	17
14	36	40	1000	1000	1,20	1,10	4	18
15	35	39	1000	1000	1,20	1,10	4	18

Prilog 3. Rezultati bušenja svrdlima iz skupine uzoraka C

Skupina uzoraka C					Napon U=228 V			
Redni broj provrta	Temperatura bušenja [°C]		Broj okretaja [min ⁻¹]		Jakost struje [A]		Vrijeme bušenja [s]	
	Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla	
	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm
1	37	44	1000	1000	0,85	1,10	1027	29
2	-	45	1000	1000	-	1,20	-	9
3	-	45	1000	1000	-	1,00	-	18
4	-	44	1000	1000	-	1,00	-	22
5	-	46	1000	1000	-	1,00	-	26
6	-	44	1000	1000	-	1,20	-	12
7	-	46	1000	1000	-	1,20	-	12
8	-	49	1000	1000	-	1,20	-	15
9	-	49	1000	1000	-	1,10	-	21
10	-	50	1000	1000	-	1,20	-	18
11	-	51	1000	1000	-	1,00	-	21
12	-	46	1000	1000	-	0,95	-	32
13	-	43	1000	1000	-	0,90	-	27
14	-	48	1000	1000	-	1,00	-	25
15	-	47	1000	1000	-	1,00	-	27

Prilog 4. Rezultati bušenja svrdlima iz skupine uzoraka D

Skupina uzoraka D					Napon U=228 V			
Redni broj provrta	Temperatura bušenja [°C]		Broj okretaja [min ⁻¹]		Jakost struje [A]		Vrijeme bušenja [s]	
	Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla		Promjer svrdla	
	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm
1	37	39	1000	1000	1,10	1,00	9	12
2	38	42	1000	1000	1,10	1,10	8	12
3	38	41	1000	1000	1,30	1,00	4	13
4	38	44	1000	1000	1,10	1,10	7	10
5	39	45	1000	1000	1,10	1,10	8	12
6	41	45	1000	1000	1,20	1,30	5	6
7	41	46	1000	1000	1,20	1,20	4	6
8	41	46	1000	1000	1,20	1,20	5	6
9	40	46	1000	1000	1,20	1,20	4	6
10	44	47	1000	1000	1,20	1,20	5	6
11	37	42	1000	1000	1,10	0,90	11	13
12	37	40	1000	1000	1,10	1,10	10	11
13	37	39	1000	1000	1,00	0,90	10	15
14	33	41	1000	1000	0,90	1,10	18	12
15	36	42	1000	1000	1,00	1,10	13	14

Prilog 5. Snaga izračunata prema podacima iz tablice iz priloga 1-4.

Snaga, W								
Redni broj provrta	Uzorak							
	Set 0		Set 1		Set 2		Set 3	
	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm	5 mm	8 mm
1	228	228	296	274	194	251	251	228
2	217	251	296	251	-	274	251	251
3	217	228	296	274	-	228	296	228
4	205	228	296	274	-	228	251	251
5	217	228	319	274	-	228	251	251
6	217	228	296	319	-	274	274	296
7	228	274	296	296	-	274	274	274
8	228	228	319	296	-	274	274	274
9	228	251	296	296	-	251	274	274
10	228	251	296	319	-	274	274	274
11	217	274	296	251	-	228	251	205
12	217	228	296	251	-	217	251	251
13	217	205	274	274	-	217	228	205
14	182	205	274	251	-	228	205	251
15	182	251	274	251	-	228	228	251

Prilog 6. Početne dimenzije svrdala i dimenzije nakon 10 i 15 provrta

Skupina uzoraka A								
Redni broj mjerenja	Promjer svrdla							
	5 mm				8 mm			
	d_1	d_2	d_3	L	d_1	d_2	d_3	L
1	5,010	4,860	4,890	85,20	7,997	7,898	7,757	115,02
2	4,940	4,771	4,745	85,18	7,955	7,865	7,730	114,98
3	4,868	4,715	7,710	85,16	7,915	7,765	7,725	114,96
Skupina uzoraka B								
Redni broj mjerenja	Promjer svrdla							
	5 mm				8 mm			
	d_1	d_2	d_3	L	d_1	d_2	d_3	L
1	4,988	4,972	5,042	86,48	7,969	7,602	7,553	116,48
2	4,912	4,770	5,011	86,42	7,938	7,405	7,462	116,40
3	4,895	4,755	4,992	85,36	7,888	7,388	7,425	116,34
Skupina uzoraka C								
Redni broj mjerenja	Promjer svrdla							
	5 mm				8 mm			
	d_1	d_2	d_3	L	d_1	d_2	d_3	L
1	5,012	4,898	4,999	85,00	7,840	7,795	7,835	116,58
2	4,999	4,830	4,895	85,00	7,750	7,758	7,835	116,68
3	4,950	4,805	4,845	85,00	7,685	7,705	7,825	116,74

Skupina uzoraka D								
Redni broj mjerenja	Promjer svrdla							
	5 mm				8 mm			
	d_1	d_2	d_3	L	d_1	d_2	d_3	L
1	5,009	4,948	4,985	86,40	7,960	7,740	7,650	117,06
2	5,008	4,938	4,888	86,40	7,955	7,730	7,650	117,30
3	5,004	4,925	4,875	86,40	7,940	7,728	7,650	117,30